



Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres  
-CONRED-

# MANUAL DE REFERENCIA PARA SISTEMAS DE ALERTA TEMPRANA ANTE INUNDACIONES EN GUATEMALA

Este documento es propiedad de la Secretaría Ejecutiva de CONRED reproducido con el apoyo de: TROCAIRE y Pastoral de las Verapaces

**trocaire**  
Working for a just world.





**trōcaire**  
Working for a just world.

**Manual De Referencia Para Sistemas De Alerta Temprana Ante Inundaciones En Guatemala.**

Punto resolutivo de aprobación del Manual SAT No. CN 05-9-9-2-2019  
del acta de Consejo Nacional 5-2019 con fecha 11 de septiembre de 2019.

# CONTENIDO

<b>PRESENTACIÓN</b> .....	vii
<b>Sistema de Alerta Temprana</b> .....	1
Conocimiento de los riesgos .....	1
Servicio de seguimiento y alerta .....	2
Difusión y comunicación .....	2
Capacidad de respuesta .....	2
Historial de los SAT .....	3
<b>Conocimiento del riesgo</b> .....	4
Amenaza .....	4
Inundaciones .....	4
Vulnerabilidad .....	6
Riesgo .....	6
<b>Conceptos básicos</b> .....	8
Ciclo hidrológico.....	8
Cuenca.....	10
<b>Estudio hidrológico e hidráulico</b> .....	14
Características morfológicas o morfométricas de la cuenca.....	16
Área de la cuenca ( $A_k$ ) .....	16
Perímetro de la cuenca .....	16
Identificación y longitud del cauce principal ( $L_c$ ) .....	16
Forma de la cuenca.....	16
Identificación de cauces .....	18
Orden de las corrientes ( $u$ ) .....	18
Longitud media de corrientes ( $L_u$ ) .....	19
Longitud acumulada de corrientes .....	19
Radio de bifurcación medio ( $R_b$ ) .....	19
Radio de Longitud media ( $R_i$ ) .....	20
Frecuencia o densidad de corrientes ( $F_c$ ).....	20
Densidad de drenaje ( $D$ ) .....	20
Pendiente media de la cuenca.....	20
Pendiente media del cauce principal ( $S_{cp}$ ) .....	21
Elevación máxima, media y mínima de la cuenca .....	21
Curva hipsométrica .....	22
Coeficiente de relieve ( $R_h$ ).....	22
Coeficiente de robustez ( $R_r$ ) .....	23
Tiempo de concentración.....	23
Tiempo de retardo.....	23
Tiempo de crecida o pico.....	23
Tiempo base .....	24
Mapa de Isócronas.....	24
Características biofísicas de la cuenca .....	25

Suelos .....	25
Cobertura de la cuenca .....	26
Hidrología .....	26
Método racional .....	27
Método del Servicio de Conservación de Suelos (SCS).....	27
Hidrograma Unitario .....	28
Distribuciones de probabilidad.....	29
Envolvente Regional .....	33
Regionalización de caudales máximos .....	34
Consideraciones sobre las herramientas Informáticas de análisis hidrológico.....	39
Hidráulica .....	39
Esquema numérico.....	41
Movimiento de onda .....	42
Componentes del análisis hidráulico de la crecida .....	43
Análisis de inundaciones .....	44
Establecimiento de los umbrales .....	45
Calibración de los umbrales .....	45
Nivel de exposición para identificar comunidades afectadas en la cuenca por inundaciones ..	46
Análisis de vulnerabilidades SOCIALES.....	46
Mapas de riesgo en la cuenca .....	46
<b>Monitoreo y seguimiento .....</b>	<b>47</b>
Establecimiento de puntos de monitoreo .....	47
Número óptimo de estaciones pluviométricas e hidrométricas.....	47
Ubicación de los pluviómetros .....	51
Ubicación de las miras, escalas o limnímetros .....	55
Equipo automatizado .....	59
Selección de equipos .....	60
Información satelital y radar para monitoreo de lluvia .....	60
Modelos de predicción numérica .....	61
Instrucciones para la lectura de datos observados .....	62
Lectura de datos de lluvia .....	63
Lectura de datos de nivel de los ríos .....	63
Carácter de la toma de datos .....	64
Procedimientos para guardar la información observada .....	65
Interpretación de los datos observados .....	66
<b>Difusión y comunicación.....</b>	<b>67</b>
Definición de los canales de comunicación .....	67
Selección de equipos de comunicación.....	68
Sistema de radiocomunicación de SE-CONRED .....	69
Sistema de repetición .....	69
Bases de radio .....	71
<b>Capacidad de respuesta.....</b>	<b>72</b>

Sistema CONRED .....	72
Plan nacional de respuesta .....	73
Organización de coordinadoras .....	74
<b>Operación y Mantenimiento .....</b>	<b>76</b>
Infraestructura meteorológica o hidrológica .....	76
Pluviómetro o pluviógrafo .....	76
Pluviómetros digitales .....	77
Baterías.....	77
Panel solar .....	77
Escalas limnimétricas .....	78
Pozos de limnimetros .....	78
Sensor de nivel .....	78
Sistema de radio comunicación.....	78
Regulador de voltaje .....	78
Antenas.....	78
<b>Estudios de casos.....</b>	<b>79</b>
Caso Sub-cuenca San Francisco .....	79
Caracterización morfométrica .....	80
Poblados .....	82
Usos de la Tierra .....	83
Textura del suelo .....	84
Dinámica fluvial .....	84
Climatología .....	85
Hidrología .....	85
Estimación del número de estaciones pluviométricas.....	86
Ubicación de las estaciones pluviométricas .....	87
Estimación del número óptimo y ubicación de las estaciones hidrométricas.....	87
Caso río Güipiles .....	89
Morfometría de la cuenca .....	89
Hidrología .....	89
Estudio hidráulico.....	90
Hec RAS.....	93
Escenario de inundación sin protección .....	94
Escenario de inundación con protección .....	98
<b>Bibliografía .....</b>	<b>103</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Los principales elementos de los sistemas de alerta temprana centrados en la población.....	1
Figura 2.	Ciclo hidrológico .....	9
Figura 3.	Partes de una cuenca hidrográfica .....	10
Figura 4.	Vertientes hidrográficas de Guatemala.....	11
Figura 5.	Cuencas hidrográficas de Guatemala .....	13
Figura 6.	Clasificación del estado de la cuenca según la forma de la curva hipsométrica .....	22
Figura 7.	Esquema de un hietograma e hidrograma .....	24
Figura 8.	Mapa de isócronas de una cuenca .....	25
Figura 9.	Mapa de regiones hidrológicas para la estimación de crecidas máximas.....	38
Figura 10.	Esquema de una inundación por desbordamiento lateral del cauce a la llanura de inundación natural .....	40
Figura 11.	Esquema de una inundación por desbordamiento lateral del cauce recto y con meandros.....	41
Figura 12.	Forma de la crecida durante su recorrido.....	43
Figura 13.	Esquema de un modelo de inundaciones .....	44
Figura 14.	Referencia del pluviómetro e instalación .....	51
Figura 15.	Pluviómetro tipo Hellmann de Lambrecht y probeta graduada para medición de la lámina de lluvia.....	52
Figura 16.	Pluviómetro de plástico graduado para medición de la lámina de lluvia.....	52
Figura 17.	Pluviómetro con registrador digital de plástico y aluminio.....	53
Figura 18.	Estación automática y estación hidrológica automática de Cenizas .....	54
Figura 19.	Tipos de escalas limnimétricas y escala limnimétrica en la estación hidrológica Coatepeque .....	56
Figura 20.	Escala limnimétrica de la estación hidrológica de Coatepeque.....	56
Figura 21.	Datalogger de la estación hidrológica automática .....	57
Figura 22.	Estación hidrológica automática con sensor de radar en la estación de Coatepeque ..	58
Figura 23.	Estación hidrológica automática Modesto Méndez con sensor de burbuja .....	58
Figura 24.	Sensor de nivel de agua en el tramo de observación del río Coyolate, en Parcelamiento El Naranja .....	59
Figura 25.	Estación hidrológica Puente Coyolate de INSIVUMEH sobre la ruta CA-2, de la cuenca del río Coyolate .....	60
Figura 26.	Imágenes en infrarrojo del satélite GOES R a nivel regional y país .....	61
Figura 27.	Imágenes de tormentas del radar meteorológico y estimación de la cantidad de lluvia del sistema.....	61
Figura 28.	Pronóstico de lluvia diaria del modelo GFS y NAM .....	62
Figura 29.	Ejemplo de la boleta de registro de eventos de lluvia en Excel .....	64
Figura 30.	Ejemplo de la boleta de registro diario por mes en Excel .....	65
Figura 31.	Componentes básicos del equipo de radio comunicación .....	68
Figura 32.	Tipos de antenas .....	69
Figura 33.	Puntos de repetición contemplados en el pasado en SE - CONRED.....	70

Figura 34.	Funciones de los botones de la base de radio .....	71
Figura 35.	Mapa de ubicación de la sub-cuenca San Francisco y la red de ríos .....	79
Figura 36.	Resumen de los aspectos morfométricos de la sub-cuenca San Francisco .....	81
Figura 37.	Curva hipsométrica de la sub-cuenca San Francisco.....	81
Figura 38.	Perfil hidráulico del cauce principal de la sub-cuenca San Francisco .....	82
Figura 39.	Mapa de municipios y poblados en la sub-cuenca de San Francisco.....	83
Figura 40.	Sección transversal del río en la sub-cuenca San Francisco .....	84
Figura 41.	Vista de planta en el punto de aforo de la sub-cuenca San Francisco .....	85
Figura 42.	Estimación del caudal máximo instantáneo de la sub-cuenca San Francisco .....	86
Figura 43.	Función del número óptimo de estaciones pluviométricas y el error de estimación .....	86
Figura 44.	Distribución de la red pluviométrica usando sistemas de información geográfica...87	87
Figura 45.	Ubicación de la estación hidrométrica en la sub-cuenca del río San Francisco .....	88
Figura 54.	Desbordamiento del río Güipiles bajo condiciones actuales Tr 5.....	94
Figura 55.	Desbordamiento del río Güipiles bajo condiciones actuales Tr 100.....	94
Figura 56.	Perfil de las líneas de flujo para el período de retorno de 5 años .....	95
Figura 57.	Perfil de las líneas de flujo para el período de retorno de 25 años .....	95
Figura 58.	Perfil de las líneas de flujo para el período de retorno de 50 años .....	95
Figura 59.	Perfil de las líneas de flujo para el período de retorno de 100 años.....	96
Figura 60.	Sección 1280.25 con sus líneas de flujo para los períodos de retorno de 5, 25, 50 y 100 ..96	96
Figura 61.	Sección 1120.635 con sus líneas de flujo para los períodos de retorno de 5, 25, 50 y 100 .....	96
Figura 63.	Sección 994.0094 con sus líneas de flujo para los períodos de retorno de 5, 25, 50 y 100 .....	97
Figura 64.	Sección 734.8862 con sus líneas de flujo para los períodos de retorno de 5, 25, 50 y 100 .....	97
Figura 65.	Sección 90.43661 con sus líneas de flujo para los períodos de retorno de 5, 25, 50 y 100 .....	98
Figura 66.	Diseño de la borda .....	98
Figura 67.	Zonas donde se realizará el cambio de la topografía de la sección por medio de dragado (Amarillo) y Bordas o Enrocado (Rosado) .....	99
Figura 68.	Cambio de la sección por dragado y esquemas de borda .....	99
Figura 69.	Simulación hidráulica del tramo del río Güipiles con medidas de protección período de retorno de 50 años.....	100
Figura 70.	Perfil hidráulico del tramo del río Güipiles con medidas de protección período de retorno de 100 años .....	100
Figura 71.	Perfil de las secciones transversales con las medidas de protección.....	100
Figura 72.	Perfil de las secciones transversales con las medidas de protección.....	101
Figura 73.	Perfil de las secciones transversales con las medidas de protección.....	101
Figura 74.	Simulación hidráulica sobre el tramo del río Güipiles con las medidas de protección con un período de 100 años .....	101

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla .....	12
Tabla 2 .....	12
Tabla 3 .....	12
Tabla 4 .....	17
Tabla 5 .....	18
Tabla 6 .....	21
Tabla 7 .....	29
Tabla 8 .....	36
Tabla 9 .....	36
Tabla 10 .....	37
Tabla 11 .....	37
Tabla 12 .....	48
Tabla 13 .....	89
Tabla 14 .....	90
Tabla 15 .....	94

# PRESENTACIÓN

La alerta temprana ha sido uno de los principales elementos de la reducción del riesgo de desastres, ya que el objetivo primordial de los mismos es evitar la pérdida de vidas y disminuir los impactos económicos y materiales de los desastres. Para que estos sistemas funcionen de una manera eficaz, se debe de realizar los análisis necesarios para poder establecer pronósticos de las amenazas que puedan afectar a las comunidades y de igual manera se debe incluir activamente a las comunidades en riesgo, facilitar la educación y la concientización del público sobre tales riesgos, diseminar eficazmente mensajes y alertas y garantizar una preparación constante.

En enero del 2005, la Conferencia Mundial sobre la Reducción de Desastres aprobó el “Marco de Acción de Hyogo para el 2005-2015: Aumento de la resiliencia de las naciones y las comunidades ante los desastres”. El mismo destaca claramente la importancia de la alerta temprana y exhorta al desarrollo de “sistemas de alerta temprana centrados en la población, en particular sistemas que permitan alertar a tiempo y en forma clara a las personas expuestas (...) que den orientación sobre la forma de actuar en caso de alerta (...)” [párrafo 17, ii) d)]. La Tercera Conferencia Internacional sobre Alerta Temprana (EWC III por sus siglas en inglés), celebrada en Bonn, Alemania del 27 al 29 de marzo de 2006, ofreció la oportunidad de presentar nuevos e innovadores proyectos de alerta temprana y discutir las amenazas y los riesgos naturales en todo el mundo, así como la forma de reducir al mínimo sus impactos mediante la aplicación de alertas tempranas centradas en la población.

El Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030 se adoptó en la tercera Conferencia Mundial de las Naciones Unidas celebrada en Sendai (Japón) el 18 de marzo de 2015. En este se proponen cuatro prioridades de acción y en la prioridad cuatro se propone “aumentar la preparación para casos de desastre a fin de dar una respuesta eficaz y “reconstruir mejor” en los ámbitos de la recuperación, la rehabilitación y la reconstrucción”, y entre las propuestas para lograr esta prioridad se propone “Desarrollar, mantener y fortalecer sistemas de alerta temprana y de predicción de amenazas múltiples que sean multisectoriales y estén centrados en las personas, mecanismos de comunicación de emergencias y riesgos de desastres, tecnologías sociales y sistemas de telecomunicaciones para la supervisión de amenazas, e invertir en ellos; desarrollar esos sistemas mediante un proceso participativo; adaptarlos a las necesidades de los usuarios, teniendo en cuenta las particularidades sociales y culturales, en especial de género; promover el uso de equipo e instalaciones de alerta temprana sencillos y de bajo costo; y ampliar los canales de difusión de información de alerta temprana sobre desastres naturales”.

La eficacia de estos sistemas se fundamenta en el conocimiento de la existencia de riesgos, en la activa participación de las comunidades, en un compromiso institucional que involucra a la educación como factor indispensable para la toma de conciencia ciudadana y la diseminación eficiente de las alertas, además de garantizar una preparación constante. El propósito de este Manual es servir de referencia a todo aquel que esté interesado en

implementar un Sistema de Alerta Temprana en alguna cuenca de Guatemala con el fin de que se constituya en una guía de los aspectos mínimos para tomar en cuenta en la concepción del proyecto.

Este manual ha sido preparado para orientar a técnicos y profesionales encargados del diseño, instalación, operación y mantenimiento de sistemas comunitarios de alerta temprana ante inundaciones. Este manual recoge la experiencia de la SE-CONRED y del personal de TROCAIRE y la Pastoral de Las Verapaces implementando Sistemas de Alerta Temprana ante Inundaciones en varias cuencas de Guatemala.

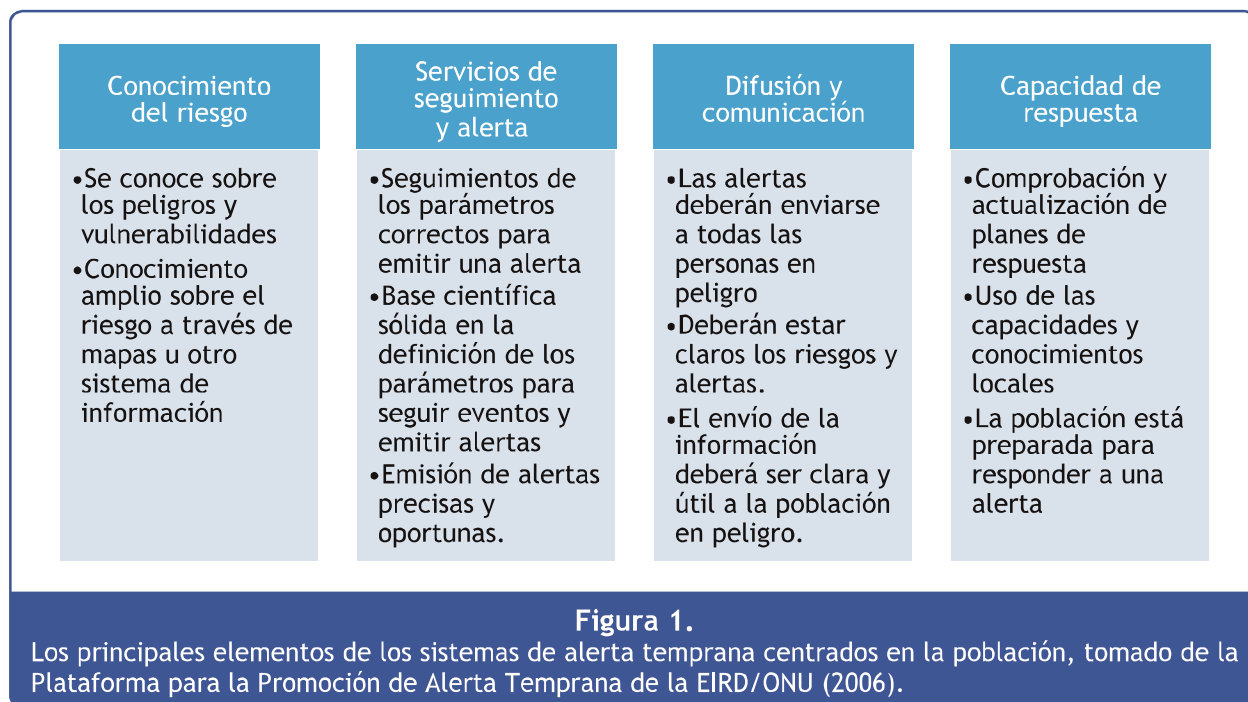
El documento está escrito tomando en cuenta los cuatro elementos del Sistema de Alerta Temprana y definiendo los elementos mínimos que se debe de trabajar en cada uno de ellos. Es importante hacer notar que se puede realizar acciones paralelas en busca de desarrollar todos los elementos, por ejemplo, se puede iniciar el proceso de organización según lo estipulado en Manual de Organización Nacional de la SE-CONRED mientras se definen los elementos de Conocimiento de Riesgo, Comunicación y Monitoreo, para luego como último paso realizar las capacitaciones sobre el funcionamiento del Sistema y los Simulacros.

## SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA

Un Sistema de Alerta Temprana (SAT) es un conjunto de mecanismos y procesos cuya función es dar aviso sobre eventos naturales próximos a las comunidades que se encuentran expuestas. Provee herramientas necesarias para tomar acciones antes y durante un evento para la prevención de desastres. Entre las amenazas o eventos más comunes a los cuales se aplican SAT se encuentran las inundaciones, huracanes y tsunamis.

El objetivo de los sistemas de alerta temprana centrados en la población es facultar a las personas y comunidades que enfrentan una amenaza para que actúen con suficiente tiempo y de modo adecuado para reducir la posibilidad de que se produzcan lesiones personales, pérdidas de vidas y daños a los bienes y al medio ambiente.

Un sistema completo y eficaz de alerta temprana comprende cuatro elementos interrelacionados, que van desde el conocimiento de los riesgos y las vulnerabilidades hasta la preparación y la capacidad de respuesta. Los sistemas de alerta temprana basados en las mejores prácticas también establecen sólidos vínculos internos y ofrecen canales eficaces de comunicación entre todos estos elementos.



### CONOCIMIENTO DE LOS RIESGOS

Los riesgos se deben a una combinación de amenazas y vulnerabilidades en un lugar determinado. La evaluación de los riesgos requiere de la recopilación y de análisis sistemáticos de información y debe tener en cuenta el carácter dinámico de las amenazas y vulnerabilidades que generan procesos tales como la urbanización, cambios en el uso de la tierra en zonas rurales, la degradación del medio

ambiente y el cambio climático. Las evaluaciones y los mapas de riesgo ayudan a motivar a la población, establecen prioridades para las necesidades de los sistemas de alerta temprana y sirven de guía para los preparativos de prevención de desastres y respuesta ante los mismos.

## **SERVICIO DE SEGUIMIENTO Y ALERTA**

Los servicios de alerta constituyen el componente fundamental del sistema. Es necesario contar con una base científica sólida para prever y prevenir amenazas y con un sistema fiable de pronósticos y alerta que funcione las 24 horas del día. Un seguimiento continuo de los parámetros y los aspectos que antecedieron las amenazas es indispensable para elaborar alertas precisas y oportunas. Los servicios de alerta para las distintas amenazas deben coordinarse en la medida de lo posible para aprovechar las redes comunes institucionales, de procedimientos y de comunicaciones.

## **DIFUSIÓN Y COMUNICACIÓN**

Las alertas deben llegar a las personas en peligro. Para generar respuestas adecuadas que ayuden a salvar vidas y medios de sustento se requiere de mensajes claros que ofrezcan información sencilla y útil. Es necesario definir previamente los sistemas de comunicación en los planos regional, nacional y local y designar portavoces autorizados. El empleo de múltiples canales de comunicación es indispensable para garantizar que la alerta llegue al mayor número posible de personas, para evitar que cualquiera de los canales falle y para reforzar el mensaje de alerta.

## **CAPACIDAD DE RESPUESTA**

Es de suma importancia que las comunidades comprendan el riesgo que corren, respeten el servicio de alerta y sepan cómo reaccionar. Al respecto, los programas de educación y preparación desempeñan un papel esencial. Asimismo, es indispensable que existan planes de gestión de desastres que hayan sido objeto de prácticas y sometidos a prueba. La población debe estar muy bien informada sobre las opciones en cuanto a una conducta segura, las rutas de escape existentes y la mejor forma de evitar daños y pérdidas de bienes.

## HISTORIAL DE LOS SAT

Guatemala es un país tropical expuesto a múltiples amenazas de origen hidrometeorológico con impactos significativos sobre el mismo. El Índice Global de Riesgo Climático 2017 ubica al país en el noveno lugar en cuanto a impacto humano y económico de fenómenos climáticos durante los últimos 20 años. La resiliencia socioeconómica mundial media es del 62%, y oscila entre el 25% en Guatemala y el 81% en Dinamarca.

El Banco Mundial (2017), ubica a Guatemala como el país con menor resiliencia socioeconómica, encontrando que US\$1 en pérdidas de activos en Guatemala equivale a una reducción de US\$4 en el consumo nacional. Baez y otros (2017), encontraron que la pobreza en Guatemala se incrementó en 5.5 puntos porcentuales a causa de los efectos del huracán Agatha en 2010. Esto evidencia el impacto significativo de desastres en el bienestar de los guatemaltecos.

Entre 1960 y 2016 el país experimentó 74 eventos severos<sup>1</sup>, 40% de dichos eventos fueron tormentas tropicales e inundaciones, seguido de terremotos con un 15% y deslizamientos con un 13%.

Guatemala es un país con tres vertientes: la más grande e importante en términos de inundaciones es la del Pacífico, la cual recoge la escorrentía de las cuencas que drenan la cadena volcánica y las tierras altas; la del Atlántico, que son los ríos que drenan hacia el norte y al mar Atlántico (México) y la más pequeña de todas, la del Caribe, que drena hacia dicha área (Fuentes, 2008).

Desde 1998 se trabaja en la implementación de Sistemas de Alerta Temprana ante Inundaciones en las cuencas de los ríos Samalá, Madre Vieja, Coyolate, Achiguate, María Linda, Polochic, Motagua, Chixoy y en la subcuenca del río Pensativo. Hasta el momento se han establecido unos 6 u 8 sistemas; pero estos han fracasado en la sostenibilidad. Algunos de ellos fueron operados con instrumentos de baja tecnología y por las propias comunidades (Fuentes, 2008).

Este manual está orientado a la implementación de un Sistema de Alerta temprana ante inundaciones, siendo uno de los principales eventos de amenaza a la población del país.

---

<sup>1</sup> Base de datos del Centro de Investigación para Desastres Epidemiológicos – EMDAT, citado por MINFIN 2018.

# CONOCIMIENTO DEL RIESGO

## AMENAZA

Es la posibilidad de la ocurrencia de un fenómeno natural, socio natural o antrópico que puede causar algún tipo de daño a la sociedad. Estos pueden ser:

- Amenazas antrópicas son las causadas consciente o inconscientemente por el ser humano tales como: incendios forestales, explosiones, aglomeraciones, linchamientos, accidentes terrestres, aéreos o acuáticos, epidemias, guerras, etc. (CONRED)
- Amenazas naturales hace referencia a los fenómenos atmosféricos, hidrológicos, geológicos (especialmente sísmicos y volcánicos) que, por su ubicación, severidad y frecuencia, tienen el potencial de afectar adversamente al ser humano, a sus estructuras y a sus actividades.
- Amenazas siconaturales es la combinación de lo natural con la participación del ser humano: inundaciones, derrumbes, deslaves, sequías, etc. (CONRED)

## INUNDACIONES

Las inundaciones ocurren cuando los cuerpos de agua (ríos, lagos, mar) tienen un aumento excesivo de su nivel y se desbordan de forma temporal. Pueden afectar poblaciones, infraestructura y recursos que se encuentren bajo sus zonas de influencia. Algunas de las posibles causas son lluvias fuertes y constantes, obstrucción de los cauces, ruptura de presas o diques y mareas altas.

### Tipos de inundaciones

**Crecidas repentinas:** se produce cuando se dan lluvias muy intensas causadas por tormentas convectivas, haciendo que escurran la mayor cantidad de agua sobre la superficie de la cuenca, lo que generará grandes caudales, causando daño en la infraestructura hidráulica (puentes, bordas, espigones, etc.) y desbordamiento en los puntos más bajos del relieve, pudiendo afectar a las poblaciones que viven dentro de las márgenes del río.

**Crecidas lentas:** se produce cuando se dan lluvias de larga duración (varios días consecutivos), el incremento del caudal es lento, causando desbordamiento y daños.

**Inundación por obstrucción de cauces u obras hidráulicas:** Suele darse por obstrucción del cauce, ya sea por un derrumbe o porque se tape el drenaje con desechos sólidos, lo que causa un incremento del nivel del agua de forma lenta.

**Ruptura de presas o diques:** Este se da cuando falla la estructura de almacenamiento o retención de agua por efecto sísmico o estructural, haciendo que toda el agua escurra de forma rápida incrementando el caudal y causando el desbordamiento del mismo, este tipo de crecidas son difíciles de predecir, lo que se recomienda es mantener una comunicación constante con el personal de operación de este tipo de obras

Inundaciones por marea alta: En ocasiones se tiene el incremento de la marea, lo que no permite el desfogue de la del caudal en la desembocadura del cauce, haciendo que el nivel aumente y se desborde el río.

### Caracterización de una inundación

De acuerdo al Programa de Entrenamiento para el Manejo de Desastres citado por Fuentes (2008), los aspectos que caracterizan a una inundación son los siguientes:

- a. Fenómenos causales: inundaciones repentinas naturales, inundación de ríos y costas a causa de lluvias intensas o inundaciones asociadas con patrones climáticos estacionales. Manipulación del hombre de las cuencas, canales de drenaje y terrenos aluviales.
- b. Características generales y efectos
  - Inundaciones repentinas: afluencia acelerada y falla de represas.
  - Inundación de río: acumulación lenta, usualmente estacional en los sistemas fluviales.
  - Inundación de la costa: asociada con ciclones tropicales, olas de tsunami y oleaje de borrasca.
- c. Factores que afectan el grado de peligro: profundidad del agua, duración, velocidad de elevación, frecuencia del suceso y condición estacional.
- d. Posibilidad de pronóstico: el pronóstico de las inundaciones depende de patrones estacionales, capacidad de drenaje de la cuenca, cartografía de inundación, reconocimientos aéreos y terrestres.
- e. Factores que contribuyen a la vulnerabilidad: ubicación de asentamientos en terrenos de aluvión, falta de conocimiento de la amenaza de inundación, reducción de la capacidad de absorción de la tierra, construcciones y cimientos no resistentes, elementos de infraestructura de alto riesgo, barcas de pesca y la industria marítima.
- f. Medidas posibles para la reducción del riesgo: control de la inundación, como canales, represas, embalses, manejo y conservación de suelos.
- g. Medidas específicas de preparativos: sistemas de detección y alerta de inundación, participación y educación de la comunidad, desarrollo de planes maestros para manejo del terreno de aluvión, cartografía de terreno de aluvión y control del uso de la tierra.

Según el PNUD citado por Fuentes (2008), las inundaciones pueden medirse y estudiarse de acuerdo con los siguientes criterios:

- a. Profundidad del agua: los cimientos de las edificaciones y la vegetación tendrán distintos grados de tolerancia a ser inundados.
- b. Duración: el daño o la gravedad del daño a estructuras, infraestructura y vegetación a menudo está asociado con el tiempo que permanecieron inundados.
- c. Velocidad: las velocidades de flujo peligrosamente altas pueden crear fuerzas erosivas y presión hidrodinámica que pueden destruir o debilitar los cimientos.
- d. Tasa de ascenso: la estimación de la tasa de ascenso y de la capacidad de descarga del río son bases importantes para decidir sobre la emisión de advertencias de inundación, la creación de planes de evacuación y códigos de reglamentación.
- e. Frecuencia de ocurrencia: un registro de los efectos acumulados y la frecuencia con la que han ocurrido las inundaciones en un período largo determinará qué tipos de construcción o actividades agrícolas pueden permitirse en la tierra de aluvión.
- f. Estacionalidad: las inundaciones que ocurren durante la temporada de cultivo pueden destruir completamente las cosechas.

## VULNERABILIDAD

Es una condición de fragilidad o susceptibilidad construida histórica y socialmente, determinada por factores socioculturales y ambientales, asociados al desarrollo que caracteriza y predispone a un individuo o sociedad a sufrir daños en caso del impacto de un fenómeno natural, amenaza socio-natural o antropogénica afectando su capacidad de recuperación. (CONRED, 2011)

Estas pueden ser:

- Vulnerabilidad ambiental se relaciona con la pérdida de la convivencia armónica del ser humano con la naturaleza, por la dominación por destrucción. (Vulnerabilidad de los ecosistemas frente a los efectos directos o indirectos de la acción humana, y por otra, altos riesgos para las comunidades que los explotan o habitan). (CONRED)
- Vulnerabilidad económica se observa una relación indirecta entre los ingresos económicos en los niveles nacional, regional, local o poblacional y el impacto de los fenómenos físicos. Es decir, la pobreza aumenta el riesgo de desastre (vulnerabilidad de los sectores más necesitados, altos índices de desempleo, insuficiencia de ingresos, explotación, inestabilidad laboral.)
- Vulnerabilidad educativa se refiere a las altas tasas de analfabetismo, niveles bajos de escolaridad, falta de programas educativos que proporcionen información sobre el medio ambiente, sobre el entorno, los desequilibrios y las formas adecuadas de comportamiento individual o colectivo en caso de amenaza o de situación de desastre (conocimiento de las realidades locales y regionales para hacer frente a los problemas). (CONRED)

## RIESGO

Riesgo es la coincidencia de una determinada amenaza y un elemento vulnerable a esta, se interpreta como la probabilidad de pérdida de vidas humanas, bienes materiales o ambientales como consecuencia de un fenómeno natural extremo con una determinada fuerza o intensidad. El riesgo puede clasificarse en:

- Riesgo aceptable o riesgo tolerable, es por consiguiente un concepto asociado importante; la medida en que un riesgo de desastre se considera aceptable o tolerable depende de las condiciones sociales, económicas, políticas, culturales, técnicas y ambientales existentes. En el campo de la ingeniería, la expresión también se utiliza para evaluar y definir las medidas estructurales y no estructurales que se necesitan para reducir los posibles daños a personas, bienes, servicios y sistemas hasta un nivel de tolerancia elegido, con arreglo a códigos o “prácticas aceptadas” basados en las probabilidades conocidas de las amenazas y otros factores. (UNISDR citado por CONRED)
- Riesgo a desastres naturales, probabilidad de consecuencias perjudiciales o pérdidas esperadas a causa de fenómenos naturales, siconaturales o antrópicos que puede presentarse en uno o varios municipios. El riesgo de desastres se deriva de la combinación de las amenazas con las condiciones de vulnerabilidad a las cuales está expuesta una comunidad.
- Riesgo de desastres probabilidad de consecuencias perjudiciales o pérdidas esperadas a causa de fenómenos naturales, siconaturales o antrópicos que puede presentarse en uno o varios municipios.

El riesgo de desastres se deriva de la combinación de las amenazas con las condiciones de vulnerabilidad a las cuales está expuesta una comunidad.

- Riesgo de desastres extensivo, riesgo de sucesos peligrosos y desastres de baja gravedad y alta frecuencia, aunque no exclusivamente asociada a amenazas muy localizadas.
- Riesgo de desastres intensivo riesgo de desastres de elevada gravedad y de frecuencia mediana a baja, principalmente asociados a amenazas importantes.
- Riesgo inminente situación extrema de riesgo cuando la probabilidad de ocurrencia de un desastre es muy alta o está próximo a ocurrir. (CONRED, 2011)

## CONCEPTOS BÁSICOS

### CICLO HIDROLÓGICO

En la Tierra el agua existe en un espacio llamado Hidrosfera, que se extiende desde unos quince kilómetros arriba de la atmósfera hasta un kilómetro por debajo de la litosfera. El agua circula en la hidrosfera a través de varias vías.

Al conjunto de transformaciones en el estado físico del agua durante su circulación por la tierra se le conoce como ciclo hidrológico.

El ciclo hidrológico es el foco central de la hidrología. El ciclo no tiene principio ni fin y sus diversos procesos ocurren en forma continua. En la figura 2, se muestra en forma esquemática como el agua se evapora desde los océanos y desde la superficie terrestre para volverse parte de la atmósfera; el vapor de agua se transporta y se eleva en la atmósfera hasta que se condensa y precipita sobre la superficie terrestre o los océanos. El agua precipitada puede ser interceptada por la vegetación y techos de casas, y convertirse en flujo superficial sobre el suelo, infiltrarse en él, correr a través del suelo como flujo subsuperficial y descargar en los ríos y lagos como escorrentía superficial.

La mayor parte del agua interceptada y de escorrentía superficial regresa a la atmósfera mediante la evaporación (del suelo y superficies de agua), y transpiración (de las plantas). El agua infiltrada, puede percolarse profundamente para recargar el agua subterránea de donde emerge en manantiales o se desliza hacia ríos para formar la escorrentía superficial, y finalmente fluye hacia el mar o se evapora en la atmósfera a medida que el ciclo hidrológico continúa.

Los procesos del sistema hidrológico se pueden agrupar en dos: a) procesos de almacenamiento, y b) procesos de transferencia.

Los procesos de almacenamiento se dan en:

- La atmósfera, por la formación de nubes producto de la evaporación de los océanos,
- La vegetación y techos por intercepción,
- Las depresiones del terreno,
- El suelo por detención superficial,
- Los cauces de ríos y quebradas,
- Los lagos y embalses,
- La zona no saturada como humedad del suelo,
- La zona saturada como aguas subterráneas.

Los procesos de transferencia se dan por:

- Precipitación pluvial,
- Infiltración en el suelo,
- Percolación a través de las rocas,

- Esgurrimiento del agua sobre el suelo (al sobrepasarse la capacidad de infiltración del suelo),
- Escorrentía del agua, en los cauces de los ríos y quebradas, o varios municipios. El riesgo de desastres se deriva de la combinación de las amenazas con las condiciones de vulnerabilidad a las cuales está expuesta una comunidad.
- Riesgo de desastres extensivo, riesgo de sucesos peligrosos y desastres de baja gravedad y alta frecuencia, aunque no exclusivamente asociada a amenazas muy localizadas.
- Riesgo de desastres intensivo riesgo de desastres de elevada gravedad y de frecuencia mediana a baja, principalmente asociados a amenazas importantes.
- Riesgo inminente situación extrema de riesgo cuando la probabilidad de ocurrencia de un desastre es muy alta o está próximo a ocurrir. (CONRED, 2011)

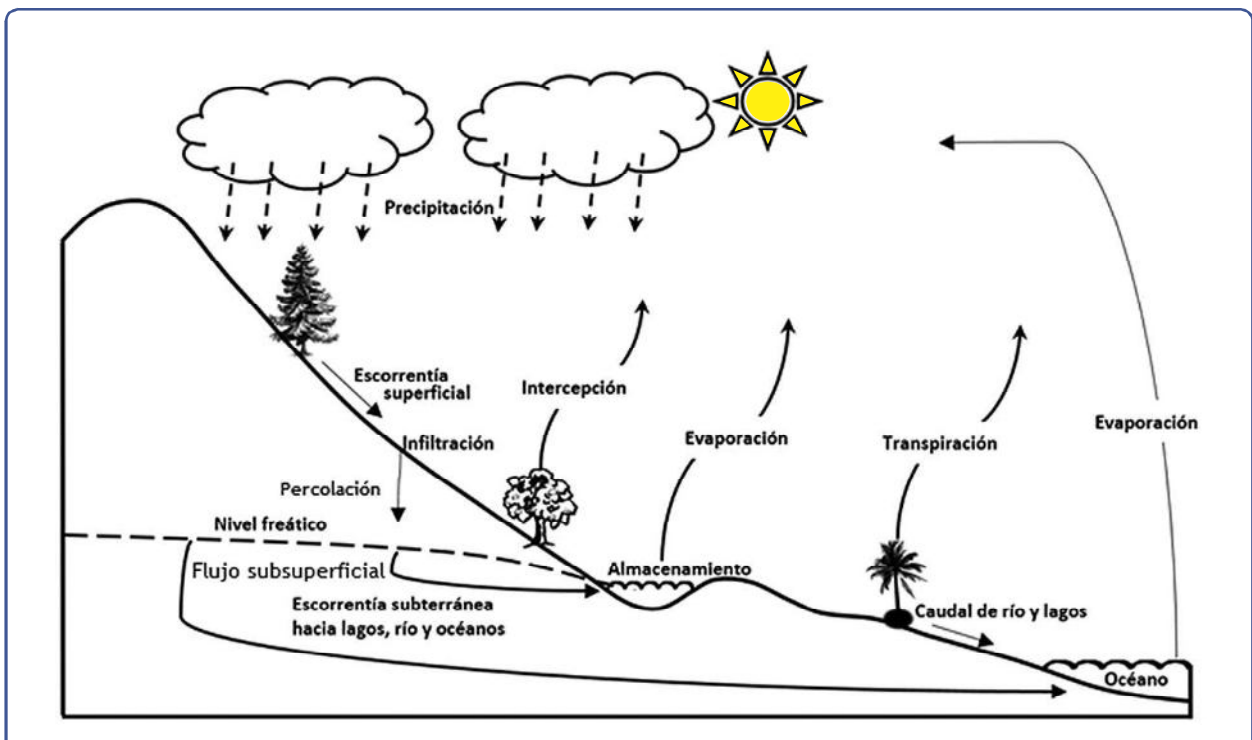


Figura 2.  
Ciclo hidrológico.

## CUENCA

Una cuenca es una zona de la superficie terrestre en donde las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida. (Aparicio, 2005). La localización de la cuenca determina parcialmente las características climáticas que dan origen a los fenómenos meteorológicos que constituyen el núcleo de la hidrología. Sin embargo, las características físicas de la cuenca no sólo controlan la respuesta hidrológica a los fenómenos meteorológicos, sino que algunas características, como la orografía y el aspecto, pueden también ser factores que determinan el clima de la cuenca (Organización Meteorológica Mundial, 1994). Entonces, se denomina cuenca hidrográfica al área de drenaje natural donde todas las aguas pluviales confluyen hacia un colector común de descarga.

Las partes de la cuenca son:

- Parte aguas: está representada por los puntos más altos de la cuenca, que delimita el área de captación.
- Zona de captación: es toda aquella área que está encerrada por el parte aguas, y que captará el agua de lluvia.
- Red fluvial: son los cauces, ríos, quebradas, riachuelos que conducirán la escorrentía hasta el punto de des carga.
- Punto de aforo o control: es el punto en donde confluyen las aguas superficiales, y representa la salida de la cuenca.



Los tipos de cuencas hidrográficas son:

- Exorreicas: son aquellas cuencas que drenan sus aguas hasta el mar u océano. Ejemplo: Cuenca de Nahualate, Naranjo, María Linda o Motagua.
- Endorreica: son las cuencas que no tienen salida hacia el mar, se caracterizan por ser cuencas cerradas y formar lago o lagunas. Ejemplo: Cuenca de Atitlán
- Arreicas: las aguas se evaporan o se filtran en el terreno antes de encauzarse en una red de drenaje, se caracterizan por no generar redes de escorrentía superficial.

El relieve guatemalteco permite que las corrientes superficiales desemboquen sus aguas en tres regiones distintas, siendo estas las vertientes: Océano Pacífico, Mar Caribe o Antillas y Golfo de México.



**Figura 4.**  
Vertientes hidrográficas de Guatemala.

INSIVUMEH (2005), la vertiente del océano Pacífico se caracteriza por estar compuesta por 17 cuencas exorreicas y una cuenca endorreica (Atitlán). Mientras, la vertiente del mar Caribe está conformada por 10 cuencas del tipo exorreico y la vertiente del Golfo de México está compuesta por 10 cuencas del tipo exorreico.

Tabla 1  
Cuencas de la vertiente del océano Pacífico

No.	Cuenca	Área (Km <sup>2</sup> )	No.	Cuenca	Área (Km <sup>2</sup> )
1.1	Coatán	270	1.10	Coyolate	1648
1.2	Suchiate	1054	1.11	Acomé	706
1.3	Naranjo	1273	1.12	Achiquate	1291
1.4	Ocosito	2035	1.13	María Linda	2727
1.5	Samala	1510	1.14	Paso Hondo	512
1.6	Sis-Icán	919	1.15	Los Esclavos	2271
1.7	Nahualate	1941	1.16	Paz	1732
1.8	Atitlán	541	1.17	Ostúa-Güija	2243
1.9	Madre Vieja	1007	1.18	Olopa	310

Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. (2005). Atlas hidrológico de Guatemala.

Tabla 2  
Cuencas de la vertiente del mar Caribe

No.	Cuenca	Área (Km <sup>2</sup> )
2.1	Grande de Zacapa	2464
2.2	Motaqua	12670
2.3	Laqo Izabal - Río Dulce	3435
2.4	Polochic	2811
2.5	Cahabón	2459
2.6	Sarstún	2109
2.7	Mopán Belice	4910
2.8	Hondo	2575
2.9	Moho	643
2.10	Temash	69

Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. (2005). Atlas hidrológico de Guatemala.

Tabla 3  
Cuencas de la vertiente del Golfo de México

No.	Cuenca	Área (Km <sup>2</sup> )
3.1	Cuilco	2274
3.2	Selegua	1535
3.3	Nentón	1451
3.4	Pojón	813
3.5	Ixcán	2085
3.6	Xacbal	1366
3.7	Salinas	12150
3.8	La Pasión	12156
3.9	Usumacinta	2638
3.10	San Pedro	14335

Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. (2005). Atlas hidrológico de Guatemala.

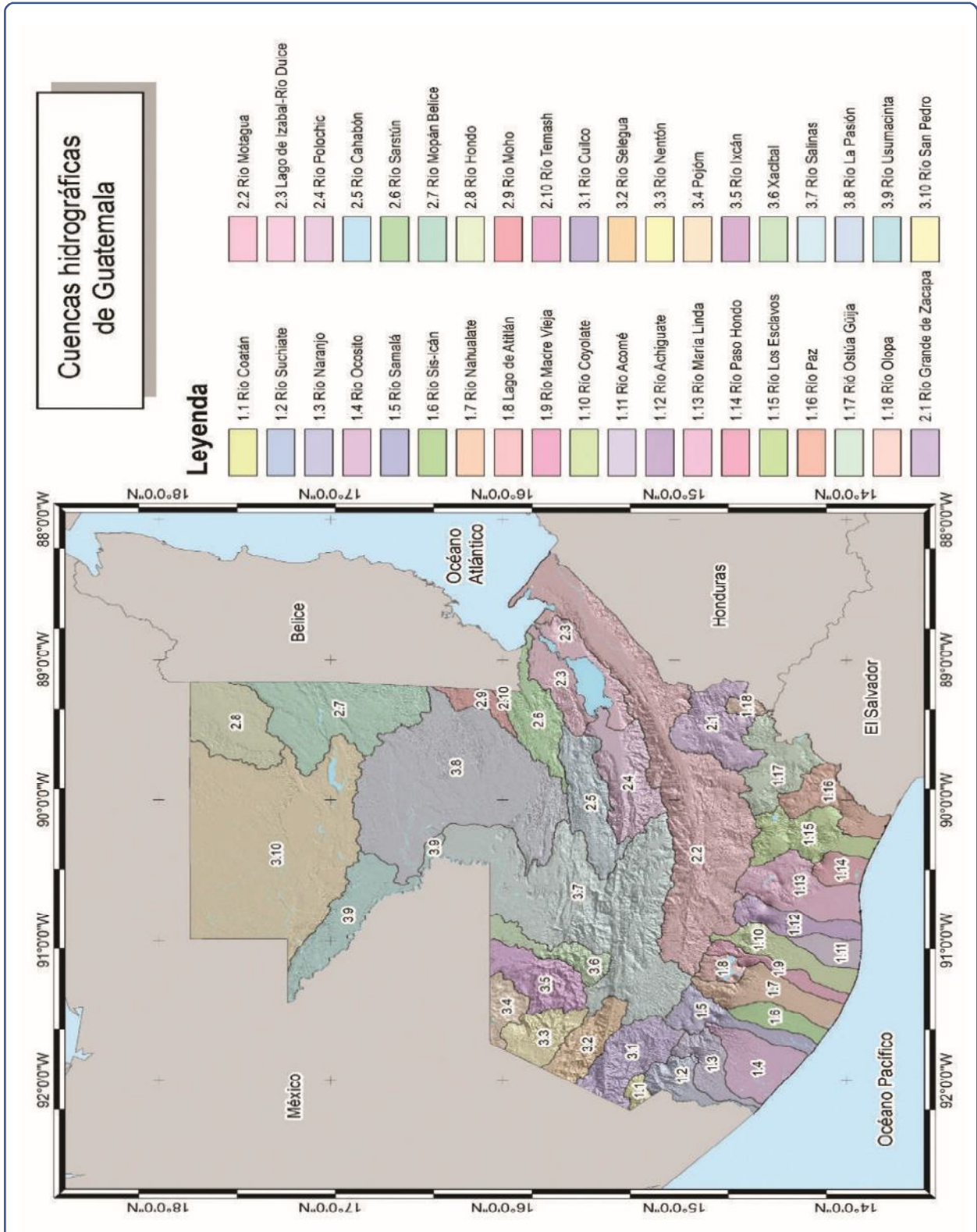


Figura 5. Cuencas hidrográficas de Guatemala.

## ESTUDIO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO

La implementación de un “sistema de alerta temprana ante inundaciones” -SAT- implica previamente realizar un estudio hidrológico e hidráulico para obtener los umbrales de alerta ante lluvias máximas, crecidas e inundaciones. Este lo deberá realizar un ingeniero civil, agrónomo o ambiental con una especialidad en hidrología o recursos hidráulicos, ya que dentro del análisis se deben contemplar, un análisis con estadística estocástica y modelación numérica para estimar los umbrales de lluvia y caudales que pueden generar la crecida o inundación. El problema de que el análisis lo realice cualquier profesional sin las bases hidrológicas, radica en la selección de las metodologías, ya que pueden emplear metodologías muy generales que no se adapten al tipo de cuenca en donde se implementará el -SAT- ante inundaciones, por lo que se podrán tener escenarios de crecidas e inundaciones que discrepen con la realidad. Aunque esta decisión, depende de la parte ejecutora del proyecto o del financista y/o su presupuesto, se sugiere que contraten a los profesionales especializados en la rama, para obtener los mejores resultados y reducir el riesgo de fallo del -SAT- ante inundaciones y sin la necesidad de poner en riesgo la vida de las personas que viven en el área amenazada. La importancia de realizar un estudio hidrológico, es que, este sirve para establecer los umbrales de lluvia que pueden generar una crecida, la cual puede causar inundaciones en las comunidades o daños en la infraestructura. Al momento de estimar la crecida máxima generada por un evento de lluvia específico o estimar el caudal de diseño para implementar una obra hidráulica de protección (espigones, gaviones, bordas, puentes, etc.) es necesario calibrar el modelo hidrológico, para tener el menor error permisible.

Los componentes de un estudio hidrológico deberán ser:

- Caracterización morfométrica de la cuenca
- Caracterización biofísica de la cuenca (Tipos de suelo, infiltración, propiedades de humedad de suelo y cobertura de la Tierra)
- Caracterización de las tormentas de diseño (Hietograma de eventos específicos, lluvia máxima probable, hietogramas sintéticos y/o curvas IDF)
- Análisis de lluvia escurrentía se deberá realizar mediante modelación hidrológica con un programa de computo especializado (Hec-HMS, PRMS, HBV, SWAT, Mike 11, etc.), se sugiere que sean del tipo semidistribuido o distribuido.
- Análisis de isócronas (Tiempo de transito de crecidas o llegada del caudal máximo a un punto de interés)

Los estudios hidráulicos sirven para establecer la cotas o niveles que puede alcanzar una crecida, identificando las cotas de inundación o áreas de inundación, establecer el tamaño de la obra de protección ante crecidas, determinar las velocidades del flujo, identificar zonas susceptibles a socavación de infraestructuras o asolvamiento, determinar propiedades hidráulicas importantes con número de Froude que se utiliza para establecer si el flujo es crítico, subcrítico o supercrítico.

Los componentes de un estudio hidráulico deberán ser:

Los componentes de un estudio hidráulico deberán ser:

- Análisis del hidrograma de diseño de cauce principal y tributarios (Hidrograma de tormenta específica, hidrograma sintético o distribución de frecuencia de caudal máximo)
- Levantamiento topográfico en las zonas de interés (Secciones transversales del cauce, zonas de inundación, etc.)
- Identificación de cotas de inundación para eventos específicos, este dato es de suma importancia en la calibración del modelo.
- Caracterización del cauce principal y sus tributarios utilizando la metodología de clasificación de ríos naturales de Rosgen (1996), esta comprende: la clasificación morfométrica, descripción morfológica, sección del cauce, banca llena y/o llanura de inundación o desbordamiento, pendiente, sinuosidad, perfil del cauce, patrón de alineamiento, etc.
- Caracterización de infraestructura hidráulica existente.
- Análisis de los niveles de la inundación con un programa de computo (Hec-Ras, Mike 21, IRIC, Open Foam, IBER, RiverGis, etc.)

La generación de umbrales de lluvia, niveles de alerta se generan mediante simulaciones de modelos hidrológicos e hidráulicos acoplados, esto quiere decir que las salidas del modelo hidrológico sirven para alimentar el modelo hidráulico, para ello, es necesario calibrar los modelos. Un modelo calibrado es aquel que es capaz de reproducir los eventos registrados.

Para calibrar un modelo hidrológico e hidráulico es necesario contar con datos reales de los eventos ocurridos en la cuenca. Si en dado caso no se cuenta con la información específica para calibrar el modelo, se deberá implementar un sistema de monitoreo y recalibración anual, el cual puede durar entre 3 a 5 años, con la finalidad de reducir el error de estimación de las crecidas e inundaciones, o bien los umbrales de alerta.

En un sistema de alerta temprana ante inundaciones es ideal implementar el pronóstico de caudales, y para ello, se debe contar con un modelo hidrológico e hidráulico calibrado, en el cual se pueda incorporar el pronóstico de lluvia obtenido con un modelo numérico de predicción meteorológica (WRF, ECMWF, GFS, NAM, etc.), esto les da a los pobladores el suficiente tiempo para prepararse, si es necesario evacuar. Para obtener los pronósticos meteorológicos a escala local, regional o global, es necesario involucrar a la sección de meteorología y pronóstico del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología -INSIVUMEH-.

## **CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS O MORFOMÉTRICAS DE LA CUENCA**

Según Aparicio (2005), las características morfológicas o morfométricas se clasifican en dos tipos: las que condicionan el volumen de escurrimiento, como el área de la cuenca y el tipo de suelo, y las que condicionan la velocidad de respuesta, como son el orden de corrientes, pendiente de la cuenca y los cauces, etc.

La cantidad de índices o características morfométricas a calcular está en función de la metodología a emplear para calcular el caudal máximo. Sin embargo, el estudio debe contemplar como mínimo los siguientes:

### **Área de la cuenca ( $A_k$ )**

El área de la cuenca consiste en aquella que se encuentra encerrada dentro del parteaguas delimitado por los puntos más altos de la cuenca, estará dada en Kilómetros cuadrados.

### **Perímetro de la cuenca**

Consiste en la longitud del parteaguas que rodea la cuenca, este parámetro se dará en kilómetros.

### **Identificación y longitud del cauce principal ( $L_c$ )**

Se le llama cauce principal a aquel que pasa por la salida o punto de control de la cuenca, generalmente tiene su origen en un manantial que se ubica en la parte alta. Este se determina mediante un análisis espacial utilizando un sistema de información geográfica, el cual, se calcula con la rejilla (raster) de dirección de flujo y el flujo acumulado, determinando el cauce más largo dentro de una cuenca o sub-cuenca. La información estará dada en kilómetros.

### **Forma de la cuenca**

La forma de la cuenca está relacionada con la rapidez con la cual la cuenca drena la escorrentía superficial producto de los eventos de precipitación o lluvia, a su vez esto se encuentra relacionado con el tiempo de concentración de la cuenca. La forma de la cuenca, se puede determinar por medio de índices, los cuales establecen cuán circular es; mientras más se acerque la forma de la cuenca a un círculo mayor será su capacidad de drenaje dado que la escorrentía superficial llegará más rápidamente hacia el punto de control o de salida de la cuenca, dando como resultado, caudales mayores si se comparan con los de una cuenca de igual área, pero cuya forma sea más alargada.

Los coeficientes a utilizar para determinar la forma de la cuenca serán: La relación de forma, la relación circular y el índice de compacidad.

### a. Relación de forma ( $R_f$ )

Horton definió la relación de forma, como la relación entre el área de la cuenca y el cuadrado de la longitud del cauce principal se determina por medio de la siguiente ecuación:

$$R_f = \frac{A_k}{L_c^2} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

$A_k$  = Área de la cuenca ( $\text{Km}^2$ )

$L_c$  = Longitud del cauce principal (Km)

Dependiendo de los valores de la relación o coeficiente de forma la cuenca puede clasificarse según se muestra en el cuadro 2.

Tabla 4

Clasificación de la forma de la cuenca en función del coeficiente.

$R_f$	Forma
0.73	Circular
1.00	Cuadrada con salida en el punto medio de los lados
0.50	Cuadrada con salida en una esquina
$0.40 < R_f < 0.50$	Ovalada
$R_f < 0.30$	Cuenca alargada

Fuente: Herrera, I. (1995). Manual de hidrología. Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.

### b. Relación circular ( $R_c$ )

Es el cociente del área de la cuenca entre el área de un círculo cuyo perímetro sea igual al de la cuenca y si su valor es 0.785 se dice que la cuenca tiene una forma cuadrada. Esta relación se expresa de la siguiente forma:

$$R_c = \frac{A_k}{A_c} = \frac{4 \cdot \pi \cdot A_k}{P^2} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

$A_k$  = Área de la cuenca ( $\text{Km}^2$ )

$A_c$  = Área de un círculo de perímetro igual al de la cuenca ( $\text{Km}^2$ )

$P$  = perímetro de la cuenca (Km)

### c. Índice de compacidad o de Gravelius ( $K_c$ )

Es la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo con igual área que la de la cuenca. La clasificación de la forma de la cuenca de acuerdo a este índice se muestra en el siguiente cuadro, el índice puede tener además valores en el orden de 3 cuando se trata de cuencas muy alargadas.

Tabla 5  
Forma de la cuenca de acuerdo al índice de compacidad.

$K_c$	Forma
$K_c = 1.00$	Circular
$1.00 < K_c < 1.25$	Casi redonda a oval redonda
$1.25 < K_c < 1.50$	Oval redonda a oval oblonga
$1.50 < K_c < 1.75$	Oval oblonga a rectangular

Fuente: Herrera, I. (1995). Manual de hidrología. Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.

La expresión para determinar el valor del índice de compacidad de una cuenca es la siguiente:

$$K_c = \frac{P_k}{P_c} = \frac{P_k}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot A_k}} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

$P_k$  = perímetro de la cuenca (Km)

$A_k$  = área de la cuenca (Km<sup>2</sup>)

$P_c$  = perímetro de un círculo con un área igual al área de la cuenca (Km)

## Identificación de cauces

Se deberá identificar los cauces permanentes, intermitentes y efímeros, así como, la cantidad correspondiente a cada tipo de cauce identificado. Según Herrera (1995), los cauces permanentes son aquellos que conducen agua todo el tiempo (Tienen aporte de las aguas subterráneas y están conectados con los acuíferos), los intermitentes aquellos que lo hacen durante determinado tiempo (Durante la época lluviosa debido a que el nivel freático sube) y los efímeros (Aquellos que conducen agua inmediatamente después de eventos de lluvia).

## Orden de las corrientes (u)

El orden de las corrientes determina cuán ramificados son los cauces de una cuenca, para determinar el orden de la cuenca en estudio se deberá utilizar el método de Horton - Strahler por ser uno de los más utilizados en Guatemala y presentar mayor facilidad respecto a otras metodologías.

Según Ven Te Chow (1994), el método funciona de la siguiente forma: *a los cauces que no tienen* tributarios se les asigna un orden de corriente uno (generalmente, es un cauce efímero), cuando dos cauces de orden 1 se unen forman un cauce de orden 2 aguas debajo de la unión (generalmente, son cauces intermitentes); en general, cuando dos canales de orden  $i$  se unen, resulta un canal de orden  $i + 1$ . Cuando un canal de orden bajo se une con un canal de orden mayor, el canal resultante hacia aguas abajo retiene el mayor de los dos órdenes. El orden de la cuenca de drenaje es el mismo del río a su salida, el mayor orden en la cuenca.

Para la cuenca, sub-cuenca o microcuenca en estudio se indicará en un cuadro resumen el orden de la corriente principal, la cantidad de cauces correspondientes a cada orden (Nu), para cada orden de corrientes se presentará la longitud total (Lu) en kilómetros, la cual se obtendrá sumando la longitud de todas las corrientes de igual orden.

### Longitud media de corrientes ( $\overline{Lu}$ )

La longitud media de corrientes es aquella longitud que en promedio tienen las corrientes dependiendo de su orden. Se obtendrá dividiendo la longitud total de corrientes de determinado orden entre la cantidad de corrientes; la expresión con la que se determinó su valor es la siguiente:

$$\overline{Lu} = \frac{\sum Lu_i}{Nu} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

Lu = Longitud de corriente (Km)

Nu = Número de corrientes de orden u (adimensional)

Longitud acumulada de corrientes

Es la longitud que se obtuvo al sumar todas las longitudes de los diferentes órdenes de corrientes, también puede obtenerse como se muestra en la siguiente expresión:

$$La = \sum \overline{Lu} * Nu \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

$\overline{Lu}$  = Longitud media de corriente (Km)

Nu = Número de orden de corriente (adimensional)

### Radio de bifurcación medio (Rb)

Es la relación entre el número de corrientes de un orden dado (u) y el del orden superior siguiente (u+1), la ecuación para determinar el radio de bifurcación entre órdenes de corrientes es la siguiente:

$$Rb_i = \frac{Nu}{N(u+1)} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

Nu = Número de corrientes de orden u (adimensional)

N (u+1) = Número de corrientes de orden superior (adimensional)

Al promedio de radio de bifurcación se le denomina radio de bifurcación medio y se calculó con la siguiente expresión:

$$Rb = \frac{\sum Rb_i}{n} \quad \text{Ec. 7}$$

### Radio de Longitud media ( $\overline{Rl}$ )

Es el promedio de la relación entre la longitud de corrientes de orden superior (u) y la de orden inferior (u-1), la ecuación con la que se determinó, es la siguiente:

$$\overline{Rl} = \frac{\sum \frac{Lu}{L(u-1)}}{n} \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

Lu = Longitud de corriente (Km)

L (u-1) = Longitud de corriente de orden inferior (Km)

### Frecuencia o densidad de corrientes (Fc)

Es la cantidad de corrientes o cauces que existen en la cuenca por unidad de área, en el caso de la cuenca en estudio se utilizará como unidad de área el kilómetro cuadrado.

Herrera (1995) indica que una cuenca con densidad de corrientes mayor tendrá una respuesta rápida ante eventos de lluvia debido a que por tener mayor concentración de cauces por unidad de área, la escorrentía superficial llegará más rápido al punto de control y por lo tanto tendrá caudales pico o de crecida mayores que si dicha cuenca tuviera una densidad de corrientes.

### Densidad de drenaje (D)

Son los kilómetros de cauce o corriente que hay en la cuenca por unidad de área; al igual que la densidad de corrientes, las cuencas con densidad de drenaje bajas tendrán caudales de crecida menores si se comparan con cuencas similares; pero con mayor densidad de drenaje. La ecuación que se utilizara para calcular la densidad de drenaje de una cuenca es la siguiente:

$$D = \frac{La}{A_k} \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

La = Longitud acumulada de corrientes (Km)

Ak = Área de la cuenca (Km<sup>2</sup>)

## Pendiente media de la cuenca

Es la pendiente que en promedio la superficie de la cuenca tiene, de acuerdo a la pendiente media de la cuenca el terreno se clasificará con la tabla 6.

$$P_m = \frac{D * \sum_{i=1}^n Lcn}{A_k} * 100 \quad \text{Ec. 10}$$

Donde:

Pm = Pendiente media de la cuenca (%)

Ak = Área de la cuenca (Km<sup>2</sup>)

D = Intervalo de las curvas de nivel en (Km)

Lcn = Longitud de las curvas de nivel en la cuenca (Km)

Tabla 6

Clasificación de la pendiente en las cuencas hidrográficas.

Pendiente (%)	Tipo de terreno
2	Plano
5	Suave
10	Accidentado medio
15	Accidentado
25	Fuertemente accidentado
50	Escarpado
> 50	Muy escarpado

Fuente: Herrera, I. (1995). Manual de hidrología. Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.

Pendiente media del cauce principal (Scp)

Por medio de sistemas de información geográfica, se calculará la pendiente existente entre tramos uniformes del cauce principal de la cuenca, posterior a ello se calculará el promedio de las pendientes entre tramos dando como resultado una pendiente media del cauce principal. También, se deberá de realizar el perfil hidráulico del cauce principal, este perfil sirve para identificar procesos de erosión, transporte y deposición de material.

$$S_c = \frac{H_{max} - H_{min}}{Lc} * 100 \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

Sc = Pendiente medio del cauce principal (%)

Lc = Longitud del cauce principal (Km)

Hmax = Elevación máxima del cauce principal (Km)

Hmin = Elevación mínima del cauce principal (Km)

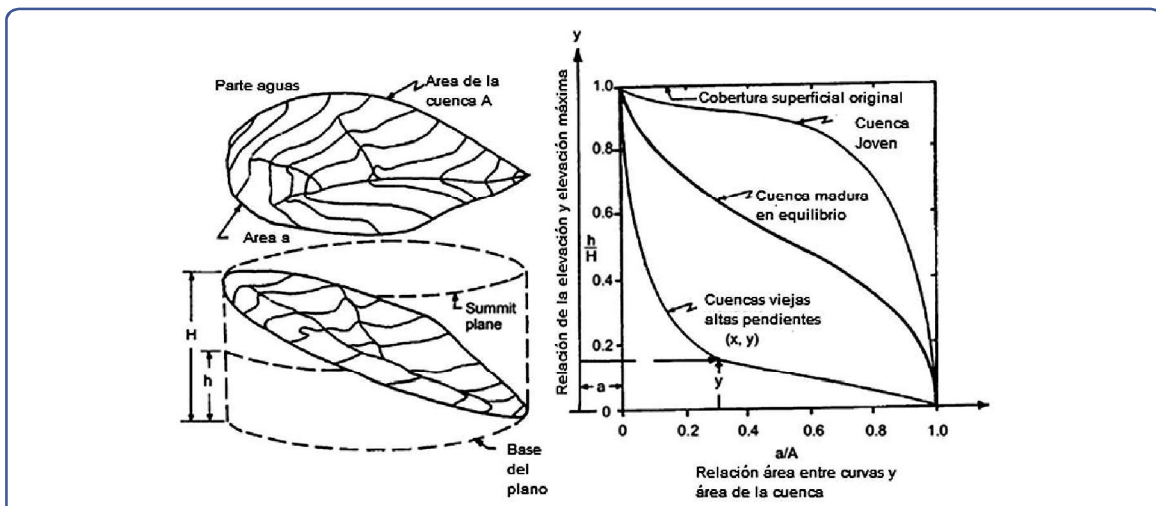
Elevación máxima, media y mínima de la cuenca

Se trata de las principales alturas en la cuenca, para la cuenca en estudio las alturas mínima y máxima se deberán relacionar con el perfil del cauce principal del inciso previo. La

altura media de la cuenca representa la elevación en la cual el área aguas arriba de dicho punto es la misma área que la que se ubica aguas abajo (50 % del área de la cuenca). Para poder obtener la elevación máxima, media y mínima de la cuenca, se recomienda realizar un análisis de frecuencias altimétricas, en donde en el eje de ordenadas se coloque las clases de la elevación y en el eje de las abscisas el porcentaje del área que estas ocupan.

### Curva hipsométrica

La curva hipsométrica representa el porcentaje de área de la cuenca que se ubica aguas arriba de cada altura o elevación. La curva hipsométrica también es de utilidad para determinar el valor de la altura media del inciso anterior a través de la mediana, al ubicar la coordenada vertical correspondiente al 50 % del área. Otra de sus funciones es también determinar el comportamiento del cauce en cuanto a la deposición de sedimentos y la erosión de la cuenca; como se observa en la siguiente figura donde se clasifica el comportamiento de la cuenca en función de la forma de la curva (Cuenca jóvenes con gran capacidad erosiva, cuencas en fase de madurez o de equilibrio y cuencas en etapa de vejez, las cuales se denominan también cuencas sedimentarias).



**Figura 6.** Clasificación del estado de la cuenca según la forma de la curva hipsométrica, tomado de River Morphology. Garde. R. J. (2006). New Age International (P) Ltd. Publishers, Dryaganj, New Delhi.

### Coeficiente de relieve (Rh)

Determina cuan accidentado es el terreno. La ecuación para su cálculo es la siguiente:

$$Rh = \frac{\Delta h}{1000 * Ltc} \quad \text{Ec. 12}$$

Donde:

$\Delta h$  = Diferencia de elevación entre el punto más alto y el punto de aforo de la cuenca (m)

Ltc = Longitud total de las curvas de nivel dentro de la cuenca (m)

## Coeficiente de robustez (Rr)

Este coeficiente sirve para determinar el grado de relieve de la cuenca.

$$Rr = \frac{\Delta h * D}{1000} \quad \text{Ec. 14}$$

Donde:

$\Delta h$  = Diferencia de elevación entre el punto más alto y el punto de aforo de la cuenca (m)

D = Intervalo entre curvas de nivel (m)

## Tiempo de concentración

Se refiere al tiempo que tarda una gota que cae en la parte más alejada de la cuenca hasta llegar al punto de control. Este parámetro es indispensable al momento de realizar estudios de crecidas e inundaciones, y a partir de este modelo se pueden establecer sistemas de alerta temprana ante inundaciones.

$$T_c = \frac{0.01947 * L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad \text{Ec. 15}$$

Donde:

$T_c$  = Tiempo de concentración (minutos)

L = Longitud del cauce principal (Km)

S = pendiente medio del cauce principal (m/m)

## Tiempo de retardo

Es el tiempo que transcurre desde que se alcanza el centro de gravedad del hietograma de precipitación neta (escorrentía) hasta que ocurre el valor máximo de caudal en el hidrograma.

$$T_{lag} = 0.6 * T_c \quad \text{Ec. 16}$$

Donde:

$T_{lag}$  = Tiempo de retardo (minutos)

$T_c$  = Tiempo de concentración (minutos)

## Tiempo de crecida o pico

Es el tiempo que transcurre desde que inicia la escorrentía o precipitación neta hasta que ocurre el valor máximo de caudal en el hidrograma.

$$T_p = T_{lag} + \frac{T_{prec}}{2} \quad \text{Ec. 16}$$

$T_p$  = Tiempo de concentración (minutos)

$T_{lag}$  = Tiempo de retardo (minutos)

$T_{prec}$  = Duración de la precipitación neta o escorrentía (minutos)

## Tiempo base

Es el tiempo que dura el hidrograma de crecida, desde que inicia el ascenso de caudal o nivel hasta que alcanza nuevamente su caudal o nivel normal.

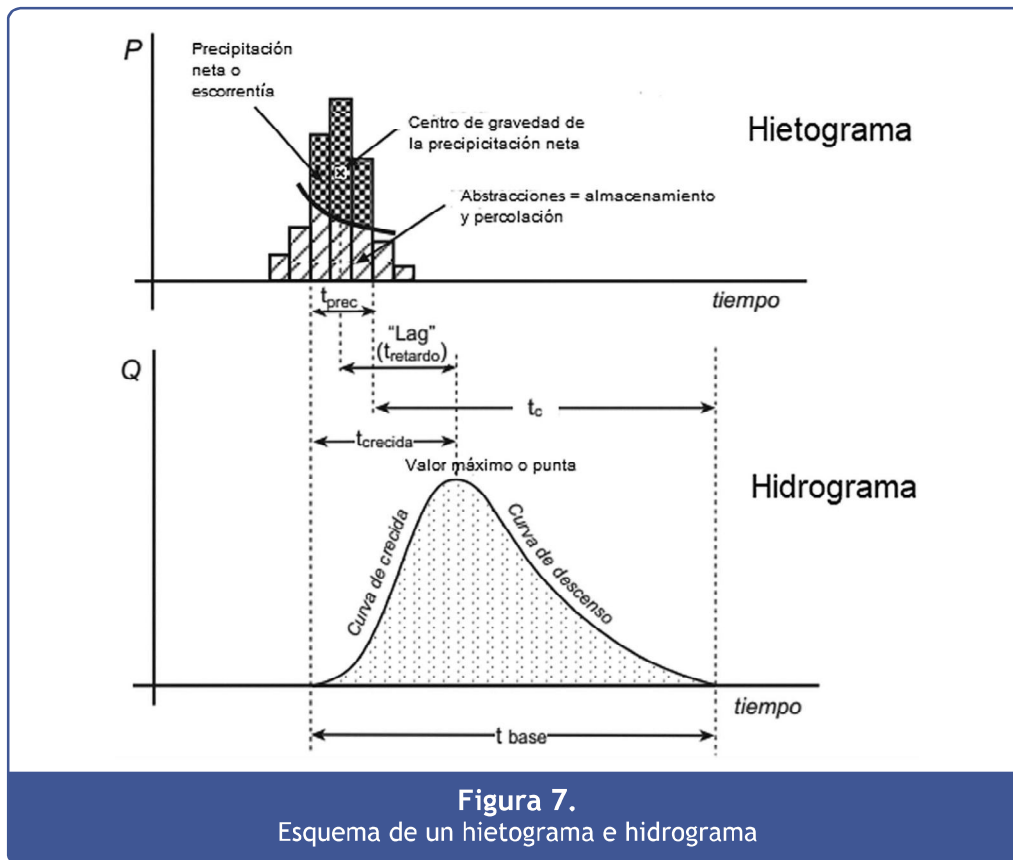
$$T_b = T_{prec} + T_c \quad \text{Ec. 17}$$

Donde:

$T_b$  = Tiempo base (minutos)

$T_{prec}$  = Duración de la precipitación neta o escorrentía (minutos)

$T_c$  = Tiempo de concentración (minutos)



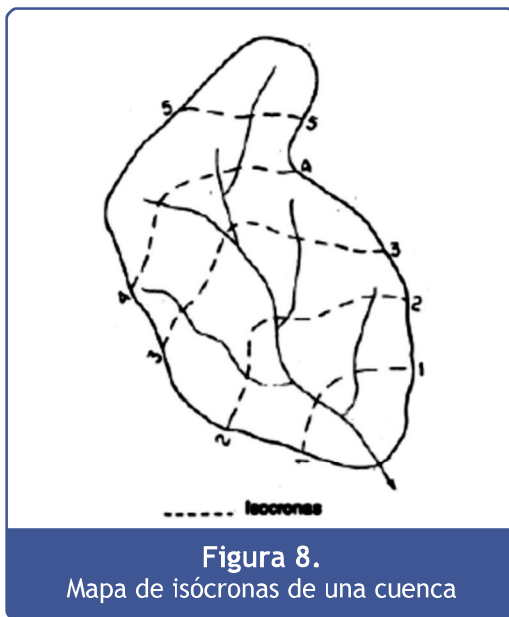
**Figura 7.**  
Esquema de un hietograma e hidrograma

## Mapa de Isócronas

Los mapas de isócronas se utilizarán para indicar el tiempo que tardará en llegar el agua de lluvia de una zona de la cuenca hasta el punto de aforo o control, este tipo de mapas es ideal para determinar los tiempos de llegada de las crecidas hacia las comunidades. Además, su aplicación radica en el establecimiento de los puntos de monitoreo de los niveles del cauce, con el fin de tener el mayor tiempo para la evacuación de una comunidad.

Usando este enfoque espacio temporal, se puede dividir la cuenca en áreas de tiempos aproximados de viaje del agua, donde las líneas que dividen la cuenca tienen el mismo tiempo de viaje y son llamadas Isócronas, deberá realizar mediante el empleo de sistemas de información geográfica.

Para determinar las isócronas deberá utilizar la ecuación de tiempo de concentración, para el cual deberá subdividir determinar las longitudes de los cauces al punto de aforo, posteriormente, calcula la pendiente media y de esta forma obtendrá el tiempo de concentración para los puntos de interés, luego interpola los puntos y genera las isolíneas de tiempo.



## CARACTERÍSTICAS BIOFÍSICAS DE LA CUENCA

La caracterización biofísica de la cuenca, consisten en la descripción de los tipos de suelos, sus propiedades de humedad y propiedades físicas, así como, la descripción del uso de la tierra. Estos, son elementos fundamentales al momento de realizar modelos de lluvia escurrentía.

### Suelos

Al realizar la caracterización de los suelos, se pretende que se aborden los siguientes temas:

- La textura indica el contenido relativo de partículas de diferente tamaño, como la arena, el limo y la arcilla, en el suelo.
- La profundidad efectiva es el espacio en el que las raíces de las plantas comunes pueden penetrar sin mayores obstáculos, con vistas a conseguir el agua y los nutrientes indispensables.
- La densidad aparente se refiere a la relación de la masa por volumen del suelo. Suelos compactos tienen densidades aparentes cercana a  $2.65 \text{ g/cm}^3$ .
- La capacidad de campo es el contenido de agua que puede retener un suelo en su espacio poroso a una tensión de  $1/3$  atmósfera de presión.
- El punto de marchitez permanente es el contenido de agua que forma parte de la constitución del suelo y que es retenida con una tensión mayor a 15 atm.

- El agua disponible es la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente.
- La infiltración está basada en un análisis del movimiento del agua en el suelo bajo condiciones de no saturación. Durante la infiltración, la fase líquida y la fase gaseosa coexisten en la masa de suelo, con excepción de la zona de contacto entre el suelo y el agua en la superficie del terreno. La infiltración, velocidad de infiltración o intensidad de entrada en el suelo, se puede definir como la velocidad de penetración del agua en el perfil del suelo, cuando la superficie del terreno está cubierta por una capa de agua poco profunda.

## Cobertura de la cuenca

Este trata de describir los distintos usos de la Tierra que existen en la cuenca con sus respectivas áreas, esta información es fundamental al momento de estimar los coeficientes de retención, abstracción y escorrentía, parámetros indispensables de un modelo de lluvia escorrentía.

## HIDROLOGÍA

Para determinar los caudales máximos, existen varias metodologías, la aplicación de una u otra dependerá de la cantidad de información disponible para su aplicación.

Se pueden encontrar tres tipos de metodologías:

1. Modelos lluvia-escorrentía: en estos modelos se requiere tener en forma simultánea lluvia y caudal en la cuenca de estudio. Dentro de estos modelos destaca el “método racional”, “Método del servicio de conservación de suelo” y el “hidrograma unitario”. Su aplicación es limitada en función de la disponibilidad de la información.
2. Modelos estadísticos: se emplean distribuciones de frecuencia para análisis de datos extremos, como la distribución Normal, lognormal, Gumbel, logGumbel, Pearson, etc.
3. Modelos con pocos o ningún registro hidrológico: en estos métodos sobre salen las “curvas envolventes”, los “hidrogramas sintéticos”, los métodos de “regionalización de caudales máximos” como la disponible en Guatemala: Estudio regional de crecidas en la República de Guatemala (INSIVUMEH 2005)

El objetivo de estas metodologías, será determinar el caudal máximo en el punto de salida de la cuenca, aguas arriba al área a proteger o puntos específicos para monitorear y emitir alertas.

Si se cuenta con datos de caudales históricos, se puede realizar un análisis estadístico de los caudales máximos instantáneos anuales para la estación más cercana al punto de interés y se calculan los caudales para los períodos de retorno determinados. Sin embargo, no siempre es posible contar con datos de caudales históricos; por lo que se vuelve necesario buscar alternativas que apliquen a los datos con los que se cuenta. A continuación, se describen algunos métodos que se pueden utilizar para la estimación del caudal máximo.

## Método racional

Esta relación empírica toma en cuenta el área de la cuenca, la altura o intensidad de la precipitación y las características de la superficie del terreno. Con estos datos, se calcula el caudal máximo.

Dado lo anterior, la duración de la lluvia será determinada a través del tiempo de concentración de la cuenca, con el objetivo de maximizar el caudal máximo de diseño.

Este método es frecuentemente utilizado en el diseño de drenajes urbanos y de carreteras y su aplicación está en función de la superficie de la cuenca. El método se limita a cuencas con superficies hasta de 2 Km<sup>2</sup>, por lo que cuencas con áreas mayores a este valor, se deberá de seleccionar otra metodología para la estimación de su caudal máximo.

La expresión para determinar el caudal máximo viene dada por:

$$Q = \frac{CIA}{3.6} \quad \text{Ec. 18}$$

Donde:

Q = es la descarga máxima (m<sup>3</sup>/s)

C = es el coeficiente de escorrentía (adimensional)

I = intensidad máxima de la lluvia de diseño (mm/h)

A = Área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

El coeficiente de escorrentía C se define como la relación entre la tasa pico de escorrentía directa y la intensidad promedio de precipitación de una tormenta. Nótese que debido a la variabilidad de la intensidad de una tormenta el coeficiente de escorrentía varía con el tiempo. Es por ello que una mejor definición de C es expresada como la relación entre la escorrentía y la precipitación en un periodo de tiempo determinado.

La intensidad de la lluvia se puede seleccionar en base a estudios o referencias locales, y en caso de contar con curvas de IDF para la región, se debe seleccionar para un determinado período de retorno la intensidad que corresponde a una duración de la lluvia igual al tiempo de concentración de la cuenca.

## Método del Servicio de Conservación de Suelos (SCS)

Este método fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS), es comúnmente utilizado para la determinación del escurrimiento directo superficial y el caudal pico de descarga. La premisa fundamental utilizada para el desarrollo de este método es que la profundidad de la capa de escurrimiento directo o exceso de precipitación  $P_e$  depende de la altura de precipitación P. Parte de la lluvia que cae al inicio de una tormenta, conocida como abstracción inicial ( $I_a$ ), no será parte del escurrimiento directo.

La retención máxima potencial S de la superficie del suelo (concepto similar al coeficiente de escorrentía C en el método racional) es una medida de la impermeabilidad del área de la cuenca.

El método consta de dos partes: en la primera, se determina el escurrimiento directo o precipitación efectiva. La segunda parte estima la descarga pico o máxima usando el valor de  $P_e$ , obtenido inicialmente.

La expresión definida por el SCS para determinar  $P_e$ , es de la siguiente forma:

$$P_e = \frac{(P-I_a)^2}{(P-I_a)+S} = \frac{(P-0.2S)^2}{P+0.8S} \quad \text{Ec. 19}$$

Donde:

$P_e$  = es el escurrimiento o precipitación en exceso (mm)

$P$  = la precipitación total, en mm.

$S$  = retención máxima potencial después del inicio del escurrimiento directo, en mm.

$I_a$  = es la abstracción inicial, incluyendo el almacenamiento superficial, intercepción e infiltración previa al escurrimiento directo. La relación entre  $I_a$  y  $S$ , desarrollada empíricamente a partir de datos de cuencas es  $I_a = 0.2S$

Para determinar  $P_e$ , primero se debe calcular  $S$ , el cual se determina como:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{Ec. 20}$$

El número adimensional  $CN$  es el número de la curva de escurrimiento directo. Su valor varía desde 0, para una superficie permeable, hasta 100 para superficies completamente impermeables y superficies de agua. Para superficies naturales  $CN < 100$ .

El número  $CN$  considera las características de la cuenca, como el tipo de suelo, uso de suelo, condición hidrológica de la cubierta y la humedad inicial del suelo justo antes de la tormenta (humedad antecedente del suelo).

## Hidrograma Unitario

El hidrograma unitario (HU) de una cuenca, se define como el hidrograma de escurrimiento directo que se produce por una lluvia efectiva o en exceso de lámina unitaria (generalmente de 1mm), de duración  $d$  y repartida uniformemente en la cuenca.

Para utilizar el método del hidrograma unitario es indispensable contar con al menos un hidrograma medido en la salida de la cuenca junto con los registros de precipitación. Definido el hidrograma unitario de una cuenca es posible determinar hidrogramas de escurrimiento directo para cualquier tormenta cuya duración de lluvia en exceso sea igual a la del hidrograma unitario. También, debido al principio de superposición de causa y efecto, el hidrograma unitario puede usarse para tormentas cuya duración en exceso sea múltiplo de la duración en exceso del hidrograma unitario.

Para construir el hidrograma unitario se emplean los siguientes pasos:

- Separar el flujo base de la escorrentía directa y determinar el tiempo base.
- Obtener el volumen de escurrimiento directo ( $V_e$ ) del hidrograma de la tormenta. El cual es la suma de los escurrimientos directos dividido por el tiempo duración en exceso de la tormenta.

- Obtener la altura de precipitación en exceso hpe, dividiendo el volumen de escurrimiento directo (Ve) por el área de la cuenca.
- Las ordenadas del hidrograma unitario se obtendrán dividiendo las ordenadas del escurrimiento directo entre la altura de precipitación en exceso hpe.
- La determinación de la duración en exceso (d) del hidrograma unitario puede hacerse a través del índice de infiltración ( $\Phi$ ). La obtención de este índice se basa en la hipótesis de que la recarga de la cuenca debida a la tormenta en estudio permanece constante a través de toda la duración de la misma. Las unidades del índice de infiltración son iguales a la de la precipitación, es decir, longitud entre tiempo.

En caso de no contar con información hidrométrica o con registros de lluvia, existe la posibilidad de crear hidrogramas unitarios basados en las características generales de la cuenca. Los de este tipo son conocidos como hidrogramas unitarios sintéticos y su construcción sigue el principio de: si el volumen de escurrimiento superficial es conocido, el caudal pico puede ser calculado suponiendo una cierta forma del hidrograma unitario.

Existe una gran cantidad de hidrogramas unitarios sintéticos. Dos de los más utilizados son: Hidrograma unitario triangular e Hidrograma sintético de Snyder.

## Distribuciones de probabilidad

En la mayoría de los casos el período de retorno para estimar una crecida máxima, sobrepasa al periodo de registros hidrológicos recolectados y el problema radica en cómo extender la tendencia al periodo deseado. Por lo que es necesario hacer extrapolaciones a partir de los valores máximos registrados de lluvias y/o caudales, para estimar la lluvia máxima o el caudal máximo en una cuenca en un período de retorno requerido se utilizan las distribuciones de probabilidad teóricas que se ajustan a los datos medidos y permiten extrapolar los valores máximos de lluvia o caudal haciendo un análisis probabilístico.

La selección de la función de probabilidad dependerá de consideraciones físicas de la cuenca estudiada, experiencias previas de tratamiento de las mismas variables en otras cuencas de estudio e inclusive por ensayo y error. Cada función de probabilidad tiene parámetros que se deberán calcular en función de la tendencia o el comportamiento de los datos, para ello, se ordenan los datos máximos anuales de menor a mayor, y de esta forma se calculan los parámetros estadísticos de las funciones.

Luego del cálculo de los parámetros de la función seleccionada, será necesario determinar el límite de confianza y pruebas de bondad del ajuste. Es de hacer notar, que existen métodos para calcular los límites de confianza, para una estación dada y un período de retorno dado.

Tabla 7  
Distribuciones de probabilidades usadas en Hidrología, Tomado de *Walk et al, (2007)*

Nombre	Acrónimo	Referencia
Normal	(N)	Gauss
Log Normal	(LN)	Hazen, 1914
Pearson Tipo III	(P3)	Foster, 1924
Valor Extremo Tipo 1	(EV1)	Gumbel, 1941
Valor Extremo Tipo 2	(EV2)	Gumbel, 1941

Nombre	Acrónimo	Referencia
Valor Extremo Tipo 3	(EV3)	Jenkinson, 1969
Gamma o Pearson Tipo 3	(G)	Morán, 1957
Gamma 3 parámetros		
Log Pearson Tipo 3	(LP3)	U.S Water Resources Council, 1981
Valor extremo generalizado	(VEG)	Jenkinson, 1969
Logística Generalizada	(GLG)	Ahmad, 1988

### Distribución normal

La distribución normal es una distribución simétrica en forma de campana, también conocida como Campana de Gauss. Aunque muchas veces no se ajusta a los datos hidrológicos tiene amplia aplicación por ejemplo a los datos transformados que siguen la distribución normal (Maggio, 2003).

#### Función de densidad:

La función de densidad está dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp^{-\frac{1}{2} \frac{(x-\mu)^2}{\sigma^2}} \quad -\infty < x < \infty \quad \text{Ec. 21}$$

Los dos parámetros de la distribución poblacional son la media ( $\mu$ ) y desviación estándar ( $\sigma$ ), y para muestras, la media ( $\bar{x}$ ) y desviación estándar ( $s$ ).

#### Estimación de parámetros:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{Ec. 22}$$

$$s = \left\{ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. 23}$$

#### Factor de frecuencia:

Si se trabaja con los X sin transformar el K se calcula como:

$$K_T = \frac{x_T - \mu}{\sigma} \quad \text{Ec. 24}$$

Este factor es el mismo de la variable normal estándar

$$K_T = F^{-1}\left(1 - \frac{1}{T}\right) \quad \text{Ec. 25}$$

### Distribución Log Normal

Si los logaritmos Y de una variable aleatoria X se distribuyen normalmente se dice que X se distribuye normalmente.

Esta distribución es muy usada para el cálculo de valores extremos por ejemplo Q máx, Q mínimos, P máx, P mínima. Tiene la ventaja que  $X > 0$  y que la transformación Log tiende a reducir la asimetría positiva ya que al sacar logaritmos se reducen en mayor proporción los datos mayores que los menores (Maggio, 2003).

#### Función de densidad:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp^{\frac{-1(y-\mu_y)}{2\sigma_y^2}} \quad x > 0 \quad \text{Ec. 26}$$

$$y = \ln x \quad \text{Ec. 27}$$

Donde

$\bar{y}$  = media de los logaritmos de la población (parámetro escalar), estimado  $\bar{y}$

$s_y$  = Desviación estándar de los logaritmos de la población, estimado  $s_y$ .

#### Estimación de parámetros:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i) \quad \text{Ec. 28}$$

$$s_y = \left\{ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln(x_i) - \bar{y})^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. 29}$$

#### Factor de frecuencia:

Puede trabajarse en el campo original y en el campo transformado.

Campo transformado: Si se trabaja en el campo transformado se trabaja con la media y la desviación estándar de los logaritmos, así:

$$\ln(X_{Tr}) = x_{Tr} + Ks_y \quad \text{Ec. 30}$$

Donde:

$$X_{Tr} = e^{\ln(x_{Tr})} \quad \text{Ec. 31}$$

Con K con variable normal estandarizada el Tr dado,  $X_y$  media de los logaritmos y  $S_y$  es la desviación estándar de los logaritmos.

Campo original: Si se trabaja con los X sin transformar el K se calcula como

$$Kt = \frac{\text{Exp} \left\{ K_T * (\ln(1 + Cv^2))^{\frac{1}{2}} - \left( \frac{\ln(1 + Cv^2)}{2} \right) \right\} - 1}{Cv} \quad \text{Ec. 32}$$

Donde:

$K$  = es la variable normal estandarizada para el  $T_r$  dado,

$Cv = \frac{s}{x}$  es el coeficiente de variación,

$x$  = media de los datos originales

$s$  = desviación estándar de los datos originales

### Distribución Gumbel ó Extrema Tipo I

Una familia importante de distribuciones usadas en el análisis de frecuencia hidrológico es la distribución general de valores extremos, la cual ha sido ampliamente utilizada para representar el comportamiento de crecientes y sequías (Raghunath, 2006).

**Función de densidad:**

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[\frac{-(x-\beta)}{\alpha} - \exp\left(\frac{-(x-\beta)}{\alpha}\right)\right] \quad \text{Ec. 33}$$

En donde  $\alpha$  y  $\beta$  son los parámetros de la distribución.

$$F(x) = \int f(x)dx = \exp\left[-\exp\left(\frac{-(x-\beta)}{\alpha}\right)\right] \quad \text{Ec. 34}$$

**Estimación de parámetros**

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} s \quad \text{Ec. 35}$$

$$\beta = \bar{x} - 0.5772\alpha \quad \text{Ec. 36}$$

Donde;

$\bar{x}$  y  $s$ , Son la media y la desviación estándar estimadas con la muestra.

**Factor de frecuencia:**

$$K_T = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left\{ 0.5772 + \ln\left[\ln\left(\frac{T_r}{T_r-1}\right)\right]\right\} \quad \text{Ec. 37}$$

Donde

$T_r$  = es el período de retorno.

Para la distribución Gumbel se tiene que el caudal para un período de retorno de 2.33 años es igual a la media de los caudales máximos.

### Distribución Pearson Tipo III

Esta distribución ha sido una de las más utilizadas en hidrología. Como la mayoría de las variables hidrológicas son sesgadas, la función PTIII se utiliza para ajustar la distribución de

frecuencia de variables tales como crecientes máximos anuales, Caudales mínimos, Volúmenes de flujo anuales y estacionales, valores de precipitaciones extremas y volúmenes de lluvia de corta duración. La función de distribución tiene dos o tres parámetros (Maggio, 2003).

**Función de densidad:**

$$f(x) = \frac{1}{\alpha|\Gamma(\beta)|} \left(\frac{x - \hat{x}_0}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\frac{x - \hat{x}_0}{\alpha}\right) \quad \text{Ec. 38}$$

Donde:

$x_0 \leq x < \infty$  para  $\beta > 0$

$-\infty < x \leq x_0$  para  $\beta < 0$

$\alpha$  y  $\beta$  son los parámetros de escala y forma, respectivamente, y  $x_0$  es el parámetro de localización.

**Estimación de parámetros:**

$$\hat{\beta} = \left(\frac{2}{C_s}\right)^2 \quad \text{Ec. 39}$$

$$\hat{\alpha} = s \frac{C_s}{2} \quad \text{Ec. 40}$$

$$\hat{x}_0 = \bar{x} - \alpha \hat{\beta} \quad \text{Ec. 41}$$

Donde:

$C_s$  es el coeficiente de asimetría,  $\bar{x}$  y  $s$  son la media y la desviación estándar de la muestra respectivamente.

**Factor de frecuencia:**

$$K \approx z + (z^2 - 1) \frac{C_s}{6} + \frac{1}{3} (z^3 - 6z) \left(\frac{C_s}{6}\right)^2 - (z^2 - 1) \left(\frac{C_s}{6}\right)^3 + z \left(\frac{C_s}{6}\right)^4 + \frac{1}{3} \left(\frac{C_s}{6}\right)^5 \quad \text{Ec. 42}$$

Donde:

$z$  es la variable normal estandarizada

Este valor de  $K$  se encuentra tabulado de acuerdo al valor  $C_s$  calculado con la muestra.

**Envolvente Regional**

De acuerdo con Biondic *et al*, (2007), el comportamiento general de los gastos máximos anuales en una región se puede apreciar en una gráfica que relaciona esta variable con la correspondiente área de drenaje de la cuenca. La curva suave que cubre a todos los puntos de esa gráfica se conoce como envolvente de gastos máximos.

Citando el mismo autor dice que la envolvente no está asociada con frecuencias o probabilidades específicas de ocurrencia, pero dentro de la región de aplicación, proporciona evidencia de las magnitudes máximas de los gastos esperados.

La envolvente permite realizar estimados gruesos de los eventos extraordinarios esperados en una determinada región, en función solamente de la superficie de la cuenca. En general, este estimado no es totalmente válido para el diseño definitivo de grandes obras hidráulicas, pero puede ser útil en estudios de gran visión, en el análisis del potencial de escurrimiento o en la estimación de eventos en zonas donde se carece de información hidrométrica.

Para una región la curva envolvente puede ajustarse a diferentes ecuaciones una de ellas y la más utilizada es la propuesta por Creager, que se detalla a continuación:

$$Q = 1.303 * Cc * \left(\frac{A}{2.59}\right)^{0.936*A^{-0.048}} \quad \text{Ec. 43}$$

Donde:

Q = caudal máximo (m<sup>3</sup>/s)

Cc = coeficiente empírico de Creager (m<sup>3</sup>/s/Km<sup>2</sup>)

A = área de la cuenca (Km<sup>2</sup>)

Creager encontró que Cc = 100 para la envolvente de los datos con los que trabajó, a la cual se le conoce como envolvente mundial. El coeficiente Cc es característico de cada región y para el caso de Guatemala se usa un Cc de 50 y para Centro América es de 65 (Orozco, 2009).

## REGIONALIZACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS

Para cuencas con muy pocos datos, el análisis histórico tiene muy poco valor para el estudio de frecuencias. En la región centroamericana este caso se presenta muy a menudo puesto que muchas de las estaciones cuentan con registros muy cortos que no llenan los requisitos para hacer un análisis de frecuencia que proporcione resultados aceptables.

Desde el punto de vista estadístico, estimaciones a partir de pequeñas muestras puede dar irrazonable o físicamente estimaciones poco realistas de parámetros, en especial para las distribuciones con un gran número de parámetros (tres o más). Grandes variaciones asociadas con tamaños de muestra pequeños causan que las estimaciones no sean realistas. En la práctica, sin embargo, los datos pueden ser limitados o en algunos casos no se tienen disponibles para un sitio. En tales casos, el análisis regional es más útil. El análisis regional se basa en el concepto de homogeneidad regional que asume que el flujo anual de poblaciones máximas en varios sitios en una región es similar en características estadísticas y no dependen en el tamaño de captación (Cunnane, 1989, citado por Ramachandra y Hamed, 2000). Aunque esta hipótesis puede no ser estrictamente válido.

La regionalización tiene dos propósitos. Para los sitios donde no se cuenta con disponibilidad de los datos, el análisis se basa en datos regionales (Cunnane, 1989 citado por Ramachandra y Hamed, 2000). Para sitios con datos disponibles, el uso conjunto de datos medidos en un sitio, llamada datos en el sitio, y los datos regionales de un número de estaciones en una región proporciona información suficiente que permita determinar una distribución de probabilidad para ser utilizado con mayor fiabilidad.

Este tipo de análisis representa una sustitución del espacio por el tiempo en que los datos de diferentes lugares de una región se utilizan para compensar los registros cortos en un solo sitio. Muchos tipos de regionalización y sus procedimientos están disponibles en Cunnane (1988 y 1989) citado por Ramachandra y Hamed (2000).

### *Caudal Índice*

De acuerdo con O. M. M., (1994), uno de los procedimientos más simples que se ha utilizado durante mucho tiempo es el método de caudal índice. La suposición clave en el índice de las inundaciones es que la distribución de las inundaciones en diferentes lugares de una región es el mismo a excepción de una escala o parámetro de inundación índice, que refleja precipitaciones y los tipos de escorrentía de cada región. Según Hosking y Wallis, citados por Ramachandra y Hamed (2000), el caudal nos proporciona la crecida media, aunque cualquier parámetro de localización de la distribución de frecuencia puede ser utilizado. En este caso, las estimaciones regionales de cuantiles ( $Q_{Tr}$ ), en un lugar determinado durante un período de retorno dado ( $Tr$ ), se puede obtener como en la ecuación que sigue, donde  $Q_{Tr}$  es la estimación de cuantiles de la distribución regional para el período de retorno dado, y  $QI$  es el caudal índice llamado también Caudal Medio Máximo ( $QMM$ ),  $K_{Tr}$  es el valor adimensional obtenido en la curva de frecuencia.

$$Q_{TR} = QI * K_{TR} \quad \text{Ec. 44}$$

Otro método de la obtención de los parámetros de la distribución regional es la estación de año enfoque (Cunnane, 1989 citado por Ramachandra y Hamed, 2000) en el que todos los datos se ponen en común, después de dividirlos por la media en cada sitio, y son tratados como una sola muestra. El uso conjunto de estos en-sitio y los datos regionales es aconsejable, siempre que una región de inundación razonablemente homogénea puede ser identificada. Los datos en un sitio pueden ser utilizados cuando el registro en una estación es excepcionalmente largo, o cuando regionales datos no están disponibles, o cuando una región es heterogénea.

El análisis regional de los métodos de análisis de frecuencia se basa en el supuesto de que la variable estandarizada  $K_{Tr} = Q_{Tr} / QI$  en cada estación ( $i$ ) tenga la misma distribución en todos los sitios en la región en estudio. En particular el Coeficiente de variación ( $Cv$ ) y Coeficiente de asimetría ( $Cs$ ), se considera constante en toda la región (Cunnane, 1989 citado por Ramachandra y Hamed, 2000). Los sitios con  $Cv$  y  $Cs$  más cercanos a la media regional no pueden sufrir de sesgo, pero grandes sesgos en sus estimaciones de cuantiles se espera para los sitios cuyos  $Cv$  y  $Cs$  se desvían de la media.

Un método de asignación de regiones homogéneas es la geográfica basada en la similitud en cuanto a los tipos de suelo, clima y topografía. Sin embargo, geográficamente no pueden ser similares desde el punto de frecuencia de las inundaciones (Cunnane, 1989 citado por Ramachandra y Hamed, 2000).

Por otra parte, dos sitios en diferentes regiones pueden llegar a ser similares en cuanto a la frecuencia de inundaciones, a pesar del hecho de que todas son geográficamente diferentes. Otro enfoque (Wiltshire, 1986 citado por Ramachandra y Hamed, 2000), es inicialmente dividir el grupo entero de

las cuencas en dos o más grupos en función de una o más características de la cuenca tomando en consideración el tamaño de la cuenca, precipitación u otras características.

**Regionalización de caudales máximos Guatemala**

El INSIVUMEH (2005) realizó un estudio de regionalizaciones de caudales máximos para las 38 cuencas de Guatemala, en el que define 8 regiones hidrológicas para la estimación de caudales máximos. El primer paso es calcular el área de la cuenca de interés en kilómetros cuadrados, posteriormente, se estima el caudal medio máximo para la región usando la ecuación 45 y los datos de la tabla 8. Y Por último se estima el caudal máximo utilizando la ecuación 46 y tablas 9, 10 u 11.

$$QMM = B * A^n \quad \text{Ec. 45}$$

$$Q_{TR} = QMM * K_{TR} \quad \text{Ec. 46}$$

Donde:

QMM = es el índice del caudal medio máximo (m<sup>3</sup>/s)

B = Coeficiente de ajuste

A = Área de la cuenca (Km<sup>2</sup>)

n = Coeficiente de ajuste

Ktr = Caudal modular por tipo de distribución de frecuencia

Qtr = Caudal máximo para un determinado período de retorno

Tabla 8  
Coeficiente para estimar el caudal medio máximo (m<sup>3</sup>/s)

Región hidrológica	Coeficientes de la crecida índice	
	B	n
Región I o Altiplano occidental	0.08	1.03
Región II Pacífico suroccidental	84	0.24
Región III o Pacífico suroriental	0.26	1.04
Región IV o Altiplano oriental	0.15	1.21
Región V o Motagua	3.62	0.64
Región VI o Polochic - Cahabón	0.75	0.91
Región VII o Planicies del Petén	0.22	0.90
Región VIII o Noroccidental	2.99	0.65

Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. (2005). Atlas hidrológico de Guatemala.

Tabla 9  
Caudales modulares según la distribución de frecuencias de Gumbel

Tr	Regiones hidrológicas							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
100	4.05	3.79	4.48	5.06	3.3	3.02	2.86	3.40
50	3.53	3.32	3.89	4.37	2.91	2.67	2.54	2.99
30	3.14	2.96	3.44	3.86	2.62	2.42	2.30	2.69
25	3.01	2.84	3.29	3.67	2.51	2.32	2.22	2.58
20	2.84	2.68	3.09	3.44	2.38	2.21	2.12	2.44
10	2.30	2.19	2.48	2.73	1.98	1.85	1.79	2.02
5	1.74	1.68	1.84	1.99	1.55	1.48	1.44	1.57

2	0.89	0.90	0.87	0.86	0.91	0.92	0.93	0.91
---	------	------	------	------	------	------	------	------

Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. (2005). Atlas hidrológico de Guatemala.

Tabla 10  
Caudales modulares según la distribución de frecuencias de logNormal

Tr	Regiones hidrológicas							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
100	3.59	3.62	5.62	5.66	3.01	3.61	3.35	3.96
50	3.04	3.05	4.06	4.43	2.61	2.87	2.71	2.95
30	2.66	2.66	3.15	3.63	2.33	2.40	2.30	2.54
25	2.53	2.53	2.87	3.37	2.23	2.25	2.17	2.40
20	2.37	2.37	2.55	3.06	2.11	2.07	2.01	2.24
10	1.89	1.88	1.75	2.20	1.74	1.59	1.58	1.76
5	1.43	1.42	1.16	1.46	1.38	1.20	1.21	1.33
2	0.82	0.82	0.66	0.65	0.87	0.80	0.82	0.81

Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. (2005). Atlas hidrológico de Guatemala.

Tabla 11  
Caudales modulares según la distribución de frecuencias Envolvente

Tr	Regiones hidrológicas							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
100	4.44	4.44	5.10	5.30	4.20	4.90	3.38	4.70
50	3.95	3.90	4.36	4.60	3.66	4.26	3.00	4.10
30	3.58	3.53	3.87	4.10	3.25	3.78	2.72	3.64
25	3.44	3.40	3.72	3.90	3.13	3.60	2.62	3.48
20	3.28	3.22	3.47	3.70	2.97	3.40	2.50	3.28
10	2.8	3.70	2.85	3.05	2.48	2.82	2.10	2.75
5	2.3	2.20	2.24	2.40	2.00	2.28	1.75	2.22
2	1.6	1.49	1.45	1.50	1.38	1.60	1.28	1.50

Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. (2005). Atlas hidrológico de Guatemala.

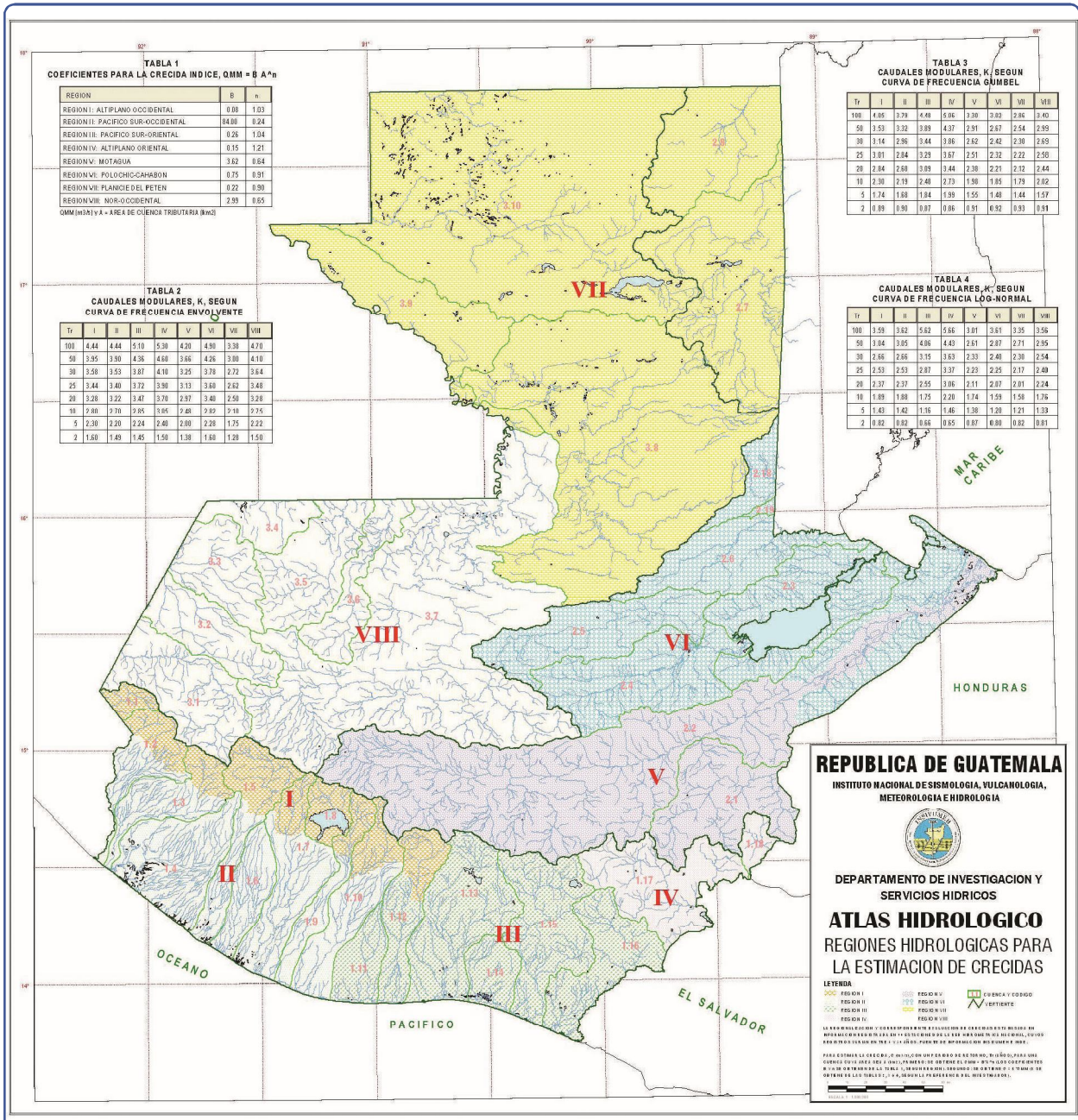


Figura 9. Mapa de regiones hidrológicas para la estimación de crecidas máximas, tomado del Atlas hidrológico, INSIVUMEH (2005)

## CONSIDERACIONES SOBRE LAS HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS DE ANÁLISIS HIDROLÓGICO

Cada vez es más frecuente el uso de modelos de computadora para generar hidrogramas de crecida máxima. Hay que tener presente que dichos modelos resuelven formulas empíricas, en algunos casos, o usan técnicas de simulación. La simulación se basa en la división de la cuenca en áreas más pequeñas a las cuales se aplica una discretización de la tormenta de diseño y se resta el volumen debido a pérdidas por infiltración e intercepción. La lluvia remanente es simulada usando una rutina de flujo superficial.

La respuesta total del área de drenaje será el resultado de la suma de los flujos superficiales de las distintas subáreas en las que se dividió la superficie original. Es importante mencionar que la validez de los resultados de la resolución de una fórmula empírica, pero, sobre todo, de los modelos de simulación, se incrementa a través del uso de datos históricos medidos, los cuales servirán para calibrar los parámetros del modelo. Es por ello que una de las desventajas del uso de modelos de simulación es que requieren de una gran cantidad de datos de entrada y, además, una amplia experiencia del usuario para obtener resultados confiables.

Existe una variedad de herramientas informáticas para el modelamiento hidrológico e hidráulico, en la región los más utilizados son los desarrollados por el Cuerpo de ingenieros del Ejército de Estados Unidos, HEC-HMS simula los procesos hidrológicos de una cuenca, dando como resultados el caudal máximo, y el HEC-RAS el cual simula los procesos hidrológicos en una sección de un río, e identifica zonas de inundación y/o cota máxima del río para cierto caudal de referencia.

Por último, independientemente de la metodología a utilizar, nunca perder de vista que el resultado final del estudio hidrológico debe proporcionar el valor del caudal máximo para el período de retorno correspondiente a la estructura a diseñar, a fin de que el analista de hidráulica pueda evaluar el comportamiento de una estructura para dicho valor.

## HIDRÁULICA

Según Chow (1994), *“el flujo de agua a través del suelo y de los canales en una cuenca es un proceso distribuido porque el caudal, la velocidad y la profundidad varían en el espacio a través de la cuenca. Estimaciones de los caudales o niveles de agua en puntos importantes de sistemas de canales naturales pueden obtenerse utilizando un modelo de tránsito distribuido de crecientes. Este tipo de modelos está basado en ecuaciones de diferenciales parciales (las ecuaciones de Saint-Venant para flujo unidimensional, bidimensional o tridimensional) que permiten el cálculo de caudal y del nivel de agua como funciones del espacio y del tiempo”*.

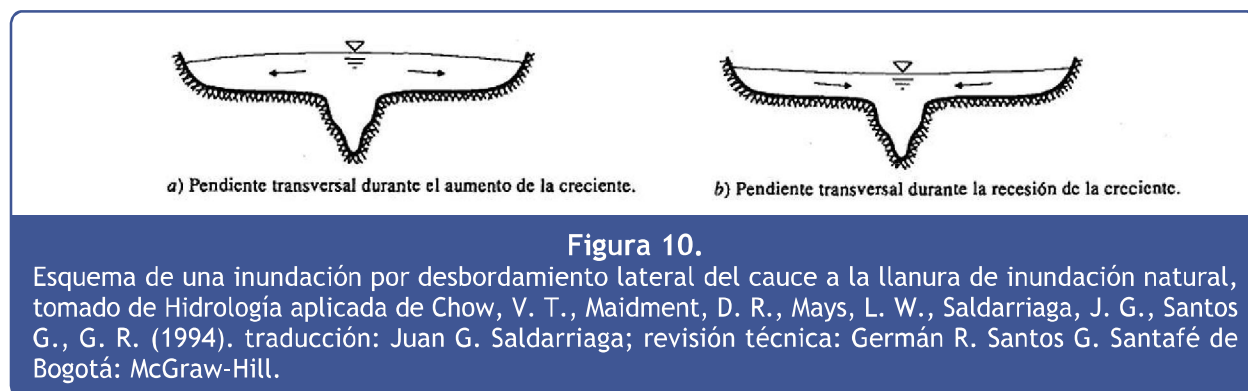
El cálculo del nivel de agua de una creciente es necesario porque este nivel delinea la planicie de inundación y determina la altura requerida por estructuras tales como puentes y diques; el cálculo de los caudales de crecientes también es importante, primero porque el caudal determina el nivel del agua, y segundo, porque el diseño de cualquier estructura de almacenamiento de la creciente tal como un embalse de detención o zonas de inundación requiere de una estimación del hidrograma de flujo de entrada. La ventaja de un modelo de tránsito distribuido de crecientes es que el modelo

distribuido calcula el caudal y el nivel de agua simultáneamente, de tal manera que el modelo aproxima mejor la naturaleza de flujo no permanente no uniforme propio de la propagación de la creciente en el canal natural o río.

Los modelos de tránsito distribuido de crecientes pueden utilizarse para describir la transformación de lluvia en escorrentía en una cuenca para producir el hidrograma de flujo a la salida de ésta, y luego tomar este hidrograma como la información de entrada en el extremo de la corriente aguas arriba de un río y transitarlo hacia el extremo de la corriente aguas abajo. Los procesos reales de flujo en todas estas aplicaciones varían en las tres dimensiones espaciales; por ejemplo, la velocidad en un río varía a lo largo y a lo ancho del mismo y también desde la superficie del agua hasta el lecho del río.

La propagación de flujo en ríos naturales es compleja debido a varios factores: uniones y tributarios, variaciones en la sección transversal, variaciones en la resistencia tanto con la profundidad de flujo como con la localización a lo largo del río, áreas inundadas y meandros en el río. La interacción entre el canal principal y la planicie de inundación o valle inundado es uno de los factores más importantes que afectan la propagación de crecientes. Durante el período de aumento de una onda de creciente, el agua fluye hacia la planicie de inundación o valle desde el canal principal, y durante la disminución de la creciente, el agua regresa del valle inundado al canal principal. El efecto del almacenamiento en el valle es disminuir el caudal durante la disminución de la creciente. Así mismo, ocurren algunas pérdidas en el valle debido a infiltración y evaporación.

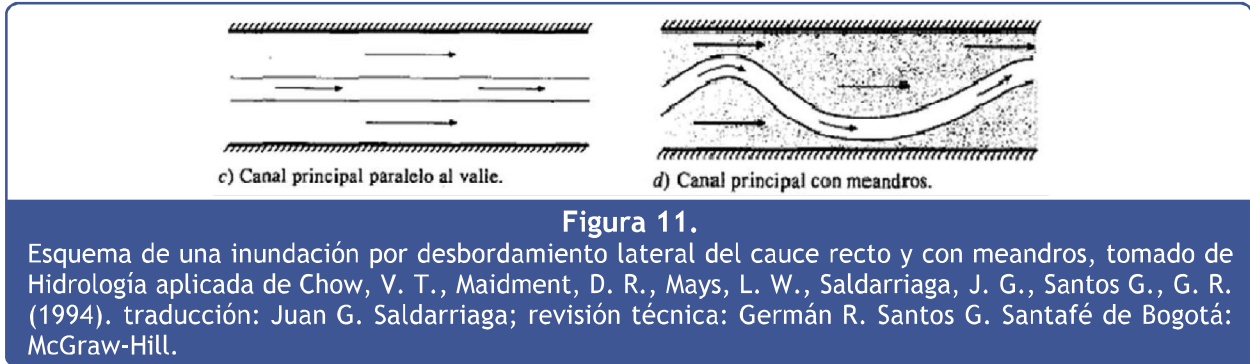
La planicie de inundación tiene un efecto en la celeridad de la onda debido a que la onda de creciente se mueve más lentamente en el valle inundado que en el canal principal de un río. Esta diferencia en las celeridades de onda dispersa la onda de creciente y produce flujo desde el canal principal hacia la planicie de inundación durante el aumento de la creciente, creando una pendiente transversal en la superficie del agua hacia afuera del canal. Durante la disminución de la creciente, la pendiente transversal se invierte desde el valle inundado hacia el canal principal, luego el agua regresa de la planicie de inundación al canal principal (Figura 10.a y 10.b).



Debido a que los ejes longitudinales del canal principal y del valle de la planicie de inundación raramente son paralelos, la situación descrita anteriormente es aún más complicada en un río con meandros. Para una creciente grande, el eje de flujo se vuelve paralelo al eje del valle. La pendiente del agua y la velocidad del agua en el valle (si las profundidades son suficientes) pueden ser mayores

que en el canal principal, que tiene una trayectoria de flujo mayor que el valle. Esto hace que sea difícil para el flujo ir desde el canal principal hacia la planicie de inundación durante el aumento de la creciente y viceversa durante la disminución de ésta. La propagación de onda de creciente es más compleja cuando el flujo varía rápidamente.

La descripción también es más complicada para un sistema de ríos con muchos brazos, con tributarios y con la posibilidad de que coincidan picos de crecientes de diferentes tributarios. También, con tributarios, los efectos de propagación de crecientes por remansos en las uniones tienen que considerarse.



Las ecuaciones de Saint-Venant para continuidad (Ec. 47) y momentum (Ec. 48), son las que rigen el flujo unidimensional no permanente en un canal abierto.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} - q = 0 \tag{Ec. 47}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\beta Q^2/A)}{\partial x} + gA \left( \frac{\partial h}{\partial x} + S_f + S_e \right) - \beta q v_x + w_f \beta = 0 \tag{Ec. 48}$$

La ecuación de momentum consta de términos para los procesos físicos que gobiernan el flujo de momentum. Estos términos son: el término de aceleración local, el cual describe el cambio en el momentum debido al cambio de la velocidad con el tiempo; el término de la aceleración convectiva, el cual describe el cambio en el momentum debido al cambio de la velocidad a lo largo del canal; el término de fuerza de presión, proporcional al cambio en la profundidad del agua; el término de fuerza gravitacional, proporcional a la pendiente del lecho  $S_0$  y el término de fuerza de fricción, proporcional a la pendiente de fricción  $S_f$ . Los términos de aceleración local y convectiva representan el efecto de las fuerzas de inercia en el flujo.

### ESQUEMA NUMÉRICO

Las ecuaciones de Saint Venant para la onda cinemática son dos ecuaciones diferenciales parciales, una de continuidad y otra de momentum. La solución de las ecuaciones requiere de métodos numéricos directos, los cuales convierten las ecuaciones diferenciales en ecuaciones de diferencias finitas para la conservación de la masa y del momentum lineal, las cuales pueden ser lineales o no lineales. Los cálculos de las variables desconocidas se hacen simultáneamente en función del espacio y del tiempo. En el caso del tránsito hidráulico de crecientes, las variables desconocidas son:  $Q$  y  $A$ .

Si se tiene una función  $f(x)$  continua en un intervalo  $(a, b)$ , el valor de  $f(x+\Delta x)$  puede ser calculado utilizando el valor de  $f(x)$ , que se supone conocido, y las derivadas de la función  $f$  en el punto  $x$  conocido. Utilizando series de Taylor y resolviendo para  $f'(x)$ , se obtiene la ecuación (4).

$$f'(x) = \left( \frac{f(x) - f(x - \Delta x)}{\Delta x} \right) \quad \text{Ec. 49}$$

Esta ecuación puede ser utilizada para solucionar la ecuación diferencial parcial, en donde la derivada es función de los valores conocidos de la función inicial.

## MOVIMIENTO DE ONDA

Los movimientos de ondas en el tránsito de crecidas se dividen en: ondas cinemáticas y ondas dinámicas, y su diferencia está en el uso de las fuerzas inerciales y de presión. En crecidas naturales están presentes las ondas cinemáticas como las ondas dinámicas.

### *Celeridad de onda cinemática*

Una onda es la variación en el flujo, haciendo un cambio en el caudal o en la elevación de la superficie del agua a lo largo del canal o cauce. La celeridad hace referencia a la velocidad. En una onda cinemática la celeridad aumenta a medida que crece el caudal, esta es la responsable que la creciente se mueva aguas abajo, haciendo que el ramal ascendente sea más empinado.

$$Ck = \frac{dQ}{dA} = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{B} \frac{dQ}{dy} \quad \text{Ec. 50}$$

Donde:

Ck= Celeridad de onda cinemática (m/s)

dQ = Caudal (m<sup>3</sup>/s)

B= Ancho del canal o cauce (m)

dy= Profundidad de la lámina de agua (m)

### *Celeridad de onda dinámica*

Esta se deduce a partir de las ecuaciones características de Saint Venant. La celeridad de onda dinámica mide la velocidad de propagación de la onda dinámica respecto al agua en reposo, por lo que existen dos ondas dinámicas, una que se mueve aguas arriba y otra que va aguas abajo

$$\frac{d}{dt} (V \pm Cd) = g(S_o - S_f) \quad \text{Ec. 51}$$

$$Cd = \sqrt{g * y} \quad \text{Ec. 52}$$

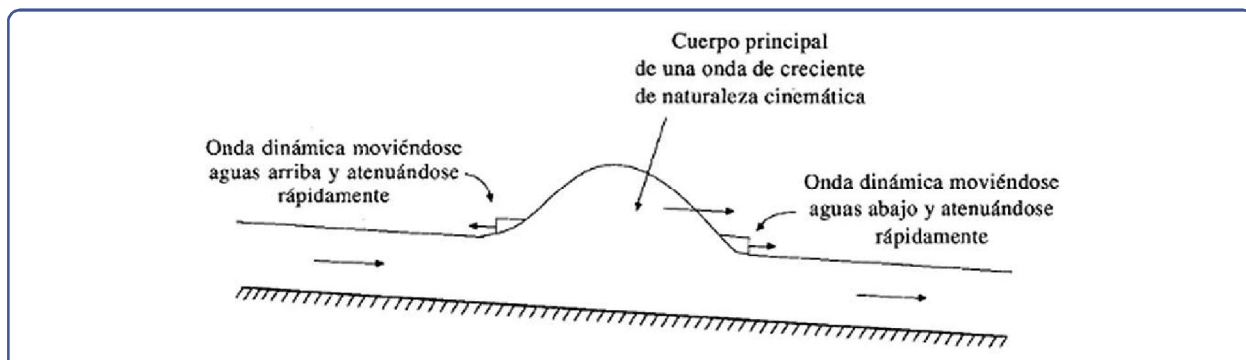
Donde:

V = Velocidad del agua (m/s)

Cd= Celeridad de onda dinámica (m/s)

g= gravedad (m/s<sup>2</sup>)

y = Profundidad de la lámina de agua (m)



**Figura 12.**

Forma de la crecida durante su recorrido, tomado de Hidrología aplicada de Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays, L. W., Saldarriaga, J. G., Santos G., G. R. (1994). traducción: Juan G. Saldarriaga; revisión técnica: Germán R. Santos G. Santafé de Bogotá: McGraw-Hill.

## COMPONENTES DEL ANÁLISIS HIDRÁULICO DE LA CRECIDA

El objetivo del análisis hidráulico es poder determinar los niveles que el río puede alcanzar para diferentes caudales de emergencia y/o el área de inundación.

El análisis hidráulico contempla:

1. Levantamiento topográfico: se debe realizar por lo menos un levantamiento topográfico en el área de estudio o en la zona previamente identificada de inundación y donde se ubicará un punto de monitoreo de niveles en el río.
2. Definir el hidrograma de diseño a partir de los umbrales de precipitaciones máximas o hietogramas de tormenta.
3. Definir el tipo de flujo a simular
4. Aplicación de un modelo hidráulico como Hec-ras, River Cad, RiverGis, IBER 2D, IRIC, etc, en el cual pueda realizar la modelización de tránsito de crecidas de onda dinámica en dos dimensiones o tres dimensiones.
5. Definir los niveles o cotas alcanzadas en el terreno o sección asociado a los caudales máximos obtenidos de los umbrales.
6. Este método también puede servir para validar los umbrales de alerta de lluvia, cuando no se tienen registro de los eventos de lluvia; pero si se tienen las cotas de las inundaciones con su respectiva documentación de fechas de ocurrencia.

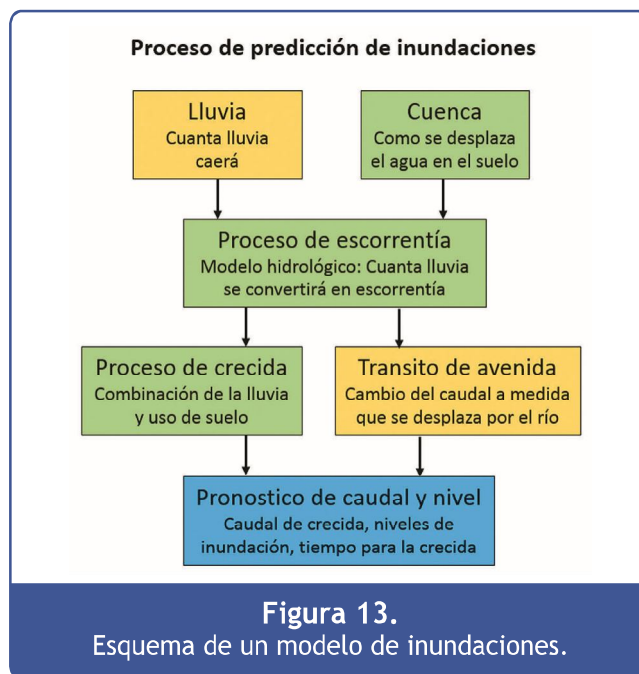
## ANÁLISIS DE INUNDACIONES

El análisis de inundaciones inicia con el proceso de la predicción de la cantidad de lluvia que caerá en la cuenca, la cual se relaciona con las características morfométricas y biofísicas de la cuenca, y son estas las que determinan la cantidad de escorrentía que se puede generar bajo un evento de lluvia. Para ello es necesario evaluarlo a través de modelos hidrológicos calibrados, los cuales consideran la lluvia como un valor que puede variar en el tiempo y las características morfométricas y biofísicas de la cuenca como una variable que no varía en el tiempo y de los cuales depende el proceso de calibración de los modelos.

El tránsito de la crecida o avenida depende de las características hidráulicas del punto a evaluar dentro del cauce del río, para lo cual se debe levantar información topográfica del área de inundación y/o de la sección del río donde se ubicará un punto de monitoreo de niveles. El estudio hidrológico tiene como principal objetivo determinar los caudales máximos que se pueden esperar en un sitio de estudio a diferentes períodos de retorno, mientras que el estudio hidráulico su objetivo es determinar las zonas que inundará ese caudal máximo y/o los niveles que alcanzará el río.

Para definir los umbrales de lluvia que causan inundación, se debe analizar datos hidrometeorológicos, en los que se analizan las alturas de lluvia que se registraron en una estación y que causaron algún tipo de inundación aguas debajo del punto de lectura. Este análisis consistirá en realizar cálculos estadísticos para obtener la mínima cantidad de lluvia que puede causar una inundación.

Los niveles de alerta sirven para darle a la población un tiempo de antelación suficiente para prepararse ante un evento de inundación. Estos niveles se pueden determinar elaborando una curva del comportamiento horario de la tormenta para un período de retorno previamente determinado por la comunidad. La curva del comportamiento horario se puede elaborar con un registro horario de la duración de una tormenta.



## ESTABLECIMIENTO DE LOS UMBRALES

Se estimarán varios umbrales, en función de los registros máximos a esperar de la siguiente manera:

- Alerta amarilla, para lluvias diarias y caudales máximos equivalente a un período de retorno de 5 años.
- Alerta anaranjada, para lluvias diarias y caudales máximos equivalente a un período de retorno de 15 años.
- Alerta roja, para lluvias diarias y caudales máximos equivalente a un período de retorno de 25 años.

## CALIBRACIÓN DE LOS UMBRALES

La calibración de los umbrales la debe de realizar un especialista en hidrología o en recursos hidráulicos con ayuda de los pobladores.

Pasos a seguir por los pobladores:

1. Identificar el nivel alcanzado por el río, deberán indicar las fechas
2. Marcar e identificar los puntos de desbordamiento del cauce y sus respectivas fechas
3. Determinar la zona afectada por el desbordamiento o inundación e indicar las fechas

La información que los comunitarios provean será de utilidad al especialista al momento de simular los eventos pasados, pero para esto es necesario contar con las fechas y las cotas de crecida e inundación, de esta forma los modelos hidráulicos se calibrarán adecuadamente, y se podrá tener un sistema con umbrales calibrados.

Pasos a seguir por el especialista:

1. Revisión de la información de lluvia existente para la zona, especialmente en las fechas de los eventos indicados por los comunitarios.
2. Levantamiento topográfico de las secciones del cauce y cotas de inundación establecidas por los comunitarios.
3. Modelo hidrológico para estimar la crecida del evento, la cuenca debe ser parametrizada con las condiciones físicas que presentaba la cuenca en dicho evento.
4. La simulación hidráulica se debe realizar bajo un escenario de flujo no permanente; pero si la información no cumple este criterio, podrá simularse bajo un escenario de flujo permanente, y se deberá de calibrar los parámetros hidráulicos con la información proporcionada por los comunitarios.
5. Exportar la información de inundaciones a un sistema de información geográfica, para realizar los mapas de amenaza de inundación, y que sirva de insumo para el establecimiento de rutas de evacuación.

## **NIVEL DE EXPOSICIÓN PARA IDENTIFICAR COMUNIDADES AFECTADAS EN LA CUENCA POR INUNDACIONES**

Para identificar el nivel de exposición de las comunidades en la cuenca a inundaciones, es necesario identificar:

- La ubicación de la comunidad respecto a la ubicación del cauce del río principal y de los afluentes.
- La diferencia de nivel del río respecto a la comunidad, si la diferencia es menor a las crecidas registradas están expuestos a inundaciones.
- La posición de la comunidad respecto a la geomorfología de la cuenca, en este punto es necesario identificar si la comunidad se encuentra dentro de la llanura de inundación o del valle de inundación.

Para corroborar la exposición se deben realizar entrevistas a los pobladores con mayor tiempo de residir en la comunidad, y determinar la frecuencia o cantidad de veces que han sufrido inundaciones. También, es necesario realizar recorridos e identificar las marcas que deja el nivel de agua después de la época lluviosa.

## **ANÁLISIS DE VULNERABILIDADES SOCIALES**

Para evaluar la vulnerabilidad social ante inundaciones se deben evaluar los siguientes aspectos:

- Capacidad de generar alternativas de adaptación frente a eventos de inundación
- Capacidad de generar opciones de Desarrollo.
- Creencias culturales
- Presencia institucional
- Grado de escolaridad
- Inclusión del tema del riesgo en instituciones educativas.
- Mecanismos de Cooperación comunitaria
- Confiabilidad en los líderes Comunitarios.
- Capacidad de Organización de la Comunidad.

## **MAPAS DE RIESGO EN LA CUENCA**

Para realizar los mapas de riesgo de inundaciones se tiene que evaluar la amenaza y la vulnerabilidad, de esta forma se podrá determinar el grado de riesgo de las comunidades ante las inundaciones.

## MONITOREO Y SEGUIMIENTO

### ESTABLECIMIENTO DE PUNTOS DE MONITOREO

Los puntos de monitorio de lluvia y caudal deberán ser seleccionados mediante un análisis de sistemas de información geográfica, hidrológico e hidráulico, el cual permita alertar a los comunitario con el suficiente tiempo para la evacuación; pero también deberán estar ubicados en lugares de fácil acceso para su constante monitoreo.

Para identificar los puntos a monitorear se realizará lo siguiente:

1. Delimitar la cuenca donde se implementará el SAT utilizando sistemas de información geográfica a escala 1: 25,000 a 1: 50,000.
2. Trazar la red fluvial utilizando el mayor detalle posible
3. Sobreponer las comunidades y los puntos de desbordamiento e inundación.
4. Determinar el mapa de pendientes de la cuenca
5. Sobreponer los mapas de isoyetas para distintos periodos de retorno
6. Calcular las isócronas para distintas intensidades o cantidades de lluvia
7. Identificar los ríos secundarios y terciarios aguas arriba o en la parte media y alta de la cuenca donde se implementará el SAT.
8. Establecer puntos de observación pluviométrica y limnimétrica en la parte media y alta de la cuenca de forma preliminar.
9. Verificar en campo que los puntos de observación pluviométrica sean de fácil acceso y estén libre de obstáculos. Mientras, los puntos de observación limnimétrica deberán estar situados en puntos donde se pueda poner una escala, sea de fácil acceso al cauce para su monitoreo.

### Número óptimo de estaciones pluviométricas e hidrométricas

#### *Redes pluviométricas*

Según Patel et. Al (2016), hay dos tipos de red de monitoreo pluviométrico, siendo estas la red primaria y secundaria. Una red primaria tiene como objetivo establecer una red permanente pluviométrica con fines climatológicos. Una red secundaria es puramente temporal para cumplir con los requisitos de un proyecto específico. La OMM (2011) recomienda valores de densidad mínima respecto de diversos tipos de estaciones hidrológicas, para zonas climáticas y geográficas diferentes. Tales recomendaciones están basadas en un estudio efectuado en 1991, basado en las respuestas de los Miembros con respecto al proyecto de evaluación de redes básicas de la OMM (OMM, 1992), y aparecen indicadas en la tabla 7. Sin embargo, Patel et. al sugiere que una red normal y económicamente factible no deberá tener no más de 150 kilómetros cuadrados por estación, ya que para estudiar fenómenos extremos de lluvia es preferible tener una red más densa; pero en cuencas donde los fenómenos meteorológicos y geológicos tienden a ser homogéneos pueden utilizarse redes de baja densidad como los establece la OMM.

Para el diseño óptimo de la red se deberá utilizar la información existente de las redes climatológicas de Guatemala, que están conformadas por el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), Instituto Nacional de Electrificación (INDE), Instituto Privado de Cambio Climático (ICC) y Asociación Nacional de Caficultores de

Guatemala (ANACAFE), y mediante la interpolación entre los valores de las diferentes estaciones, se deberá determinar con suficiente precisión las características de los elementos hidrometeorológicos básicos en cualquier punto de interés dentro de la cuenca.

Para fines prácticos la precipitación pluvial media de la cuenca se calculará mediante el método del promedio aritmético simple, y el número óptimo de estaciones pluviométricas se obtendrá mediante la siguiente ecuación:

$$N = \left( \frac{Cv}{\varepsilon} \right)^2 \quad \text{Ec. 53}$$

Donde:

N = Número de estaciones pluviométricas

Cv = Coeficiente de variación

ε = Error de estimación de la media deseado

Tabla 12

Valores mínimos recomendados de densidad de estaciones (superficie, en km<sup>2</sup> por estación)

Unidad fisiográfica	Precipitación		Flujo superficial o digitales
	Pluviómetros	Pluviógrafos	
Costa	900	9,000	2,750
Montaña	250	2,500	1,000
Planicie interior o valles intramontanos	575	5,750	1,875
Montes u ondulaciones	575	5,750	1,875
Islas pequeñas	25	250	300
Áreas urbanas	--	10 a 20	--
Tierras arridas o polos	10,000	100,000	20,000

### Redes hidrométricas

El número óptimo de las estaciones hidrométricas para establecer una red de monitoreo, consiste en la definición de la densidad de nodos de observación (o puntos de control para la observación) necesaria para reflejar en forma confiable la realidad del sistema hidrológico superficial, invirtiendo adecuadamente los recursos económicos disponibles para la instalación y operación de la red.

El número óptimo se obtiene a través de criterios físicos que incorporan el margen de error con el cual se quiere reflejar la realidad. Este reflejo debe describir el campo de variación de las variables hidroclimáticas y su relación con los factores físico y geográficos, para ello Karasiov (1968) propone los siguientes criterios:

#### a) Criterio de gradiente:

Al fijar una red de referencia se cuenta con un número discreto de nodos de observación, separados uno del otro por una distancia "l" (radio de acción) o por una diferencia de áreas de cobertura "?A". Tomando en cuenta, que en el primer nodo de observación se registra una magnitud "Y1", el nodo subsiguiente deberá ubicarse de tal manera, que las mediciones capturen un incremento "?Y" de magnitud superior al error "! " de la medición de la escorrentía.

La formulación matemática del criterio del gradiente se desprende de la definición de este mismo y tiene en cuenta que para dos nodos vecinos el incremento de "Y" debe superar dos veces el error sistemático de su medición; así, el incremento "Y" entre dos nodos de observación separados por una distancia "l" (entre centroides) debe ser:

$$\Delta Y(l) = l \text{ grad}(Y) \geq 2\sigma \quad \text{Ec. 54}$$

$$\sigma = \frac{cv}{\sqrt{N}} \quad \text{Ec. 55}$$

Donde:

$\sigma$  = Error de edición de escorrentía

Cv = Coeficiente de variación

N = Número de observaciones

Teniendo en cuenta lo anterior, se obtiene que el área de gradiente es:

$$A_{grad} \geq \frac{8\sigma^2 Y_0^2}{\text{grad}(Y)^2} \quad \text{Ec. 56}$$

Donde:

$A_{grad}$  = Área aferente necesaria para que el incremento de "Y" sea mayor que el margen de error de la medición.

$Y_0$  = Norma de escorrentía

$\text{grad}(Y)$  = gradiente de "Y"

Cálculo de la norma de escorrentía

$$Y_0 = \frac{Y}{Med} \quad \text{Ec. 57}$$

Donde:

Y: escorrentía

Med: Media

Cálculo de gradiente de escorrentía

$$\text{grad}(Y) = \frac{\Delta Y}{A} \quad \text{Ec. 58}$$

Donde:

$\Delta Y$ : Variación de la escorrentía

A: Área

b) Criterio de correlatividad

Es necesario determinar, que tanto se pueden alejar los puntos de observación uno del otro para mantener gradualmente y en forma discreta la continuidad del proceso. Es la aplicación del criterio correlativo la que define la distancia máxima que puede existir entre nodos de observación para que no se pierda la memoria (continuidad) del proceso.

La expresión para el cálculo del área correlativa es la siguiente:

$$A_{corre} \leq \frac{\sigma_0^4}{a^2 C_v^4} \quad \text{Ec. 59}$$

Donde:

A<sub>corre</sub> = Área correlativa después de la cual se pierde la conexión estadística entre estaciones

C<sub>v</sub> = Coeficiente de Variación de "Y"

a = 1/Lo; Lo = Radio Correlativo (distancia a la cual la correlación entre estaciones tiende a "0")

σ<sub>0</sub> = Desviación estándar de "Y"

c) Criterio de representatividad

La determinación del área representativa, depende de la variable en estudio. Para el caso de la escorrentía se debe considerar la variación de ésta con respecto al área; esta dependencia Y=f(A) no es más que una relación entre la escorrentía y el área aferente de las estaciones de monitoreo, esta fórmula se considera como la primera aproximación de los umbrales de representatividad.

d) Criterios de optimización para estaciones de régimen general

Después de obtener el desarrollo de criterios es necesario establecer las reglas para la designación del área óptima, con su correspondiente densidad de estaciones de régimen general. El área óptima que debe cubrir cada estación de régimen general, en la mayoría de los casos se determina por la siguiente relación:

$$A_{representativa} \leq A_{gradiente} \leq A_{optima} \leq A_{correlativa} \quad \text{Ec. 60}$$

De aquí se obtiene que el número óptimo de nodos N será igual a:

$$N_{nodos} = \frac{\text{Área de la cuenca}}{A_{optima}} \quad \text{Ec. 61}$$

Pueden presentarse los siguientes casos:

a) Caso 1

$$\begin{aligned} &A_{correlativa} > A_{gradiente} > A_{representativa} \\ &A_{gradiente} > A_{correlativa} > A_{representativa} \\ &A_{correlativa} > A_{representativa} > A_{gradiente} \\ &A_{gradiente} > A_{representativa} > A_{correlativa} \end{aligned}$$

En esta situación el área óptima es igual a:

$$A_{optima} = (A_{correlativa} + A_{gradiente}) / 2 \quad \text{Ec. 62}$$

b) Caso 2

$$\begin{aligned} &A_{representativa} > A_{correlativa} > A_{gradiente} \\ &A_{representativa} > A_{gradiente} > A_{correlativa} \end{aligned}$$

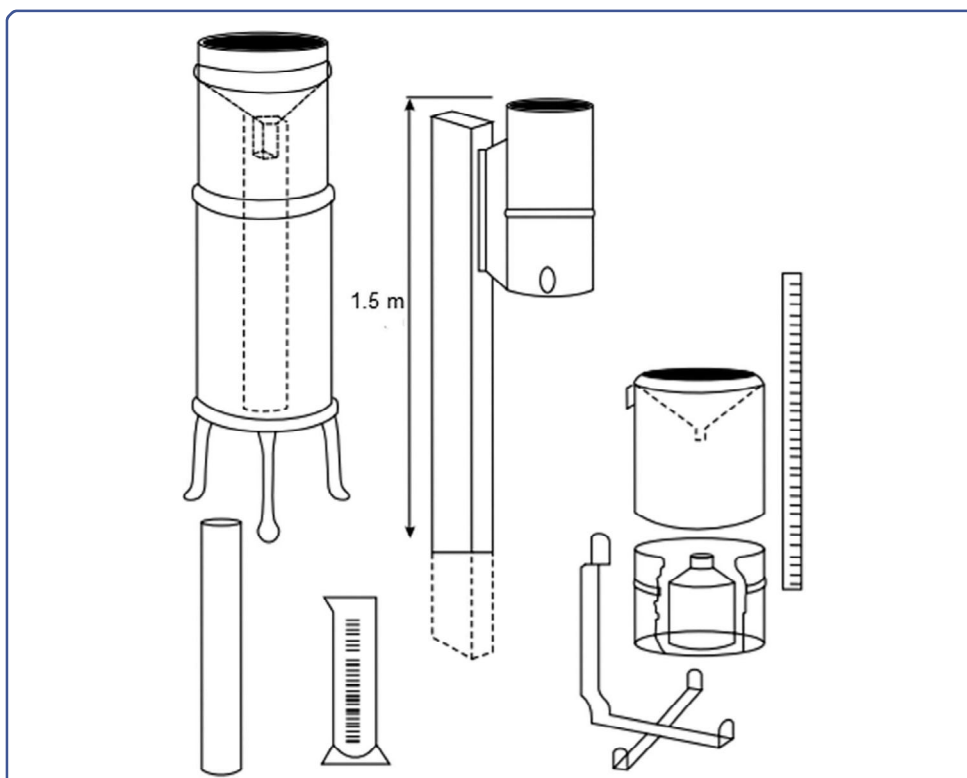
En esta situación se debe tomar:

$$A_{optima} = A_{representativa} \quad \text{Ec. 63}$$

## UBICACIÓN DE LOS PLUVIÓMETROS

Para ubicar los pluviómetros se deben de seguir los siguientes pasos:

- accesible a los voluntarios que harán las lecturas y garantizar la seguridad física;
- preferiblemente en la parte alta y media de la cuenca;
- la cantidad de estaciones pluviométricas va a depender de la extensión de la cuenca;
- área despejada de follajes;
- zona sin peligro de inundación;
- sitio relativamente plano;
- el pluviómetro debe ubicarse a un metro y medio (1.50m) sobre la superficie del suelo, a nivel, evitando cualquier inclinación, sobre una base vertical.



**Figura 10.**

Referencia del pluviómetro e instalación, adaptado del manual teórico y práctico de observadores meteorológicos, comisión nacional del agua (2010). México

### *Pluviómetro convencional*

Este tipo de pluviómetro se pueden obtener registros de lluvia acumulados en 24 horas o en tiempos determinados por los operadores del SAT. Este pluviómetro reúne los estándares establecidos por la Organización Meteorológica Mundial. Medidores de este tipo funcionan en muchas estaciones meteorológicas y pluviométricas de Guatemala.

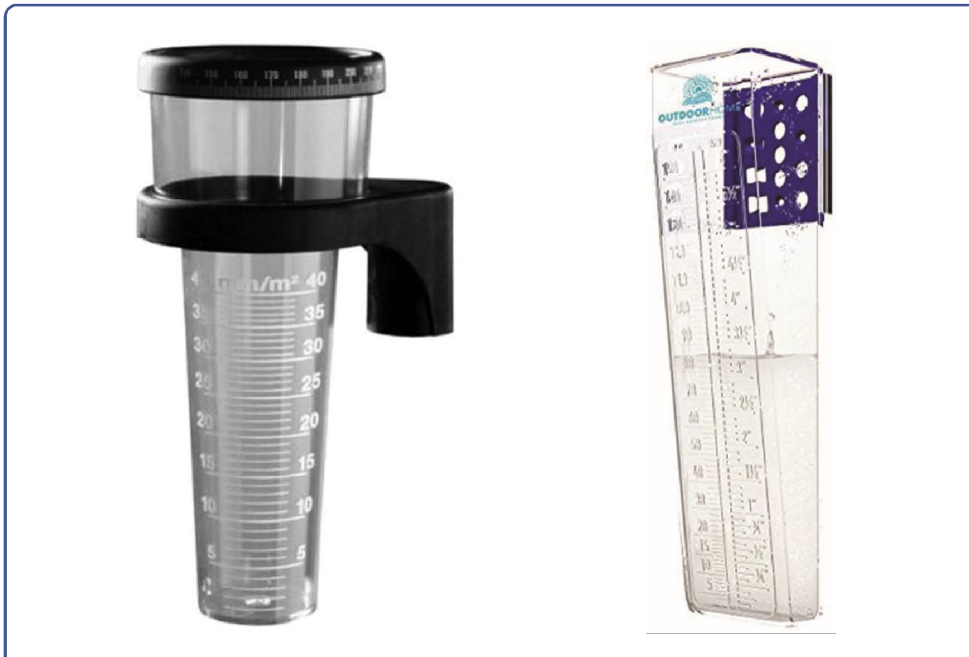
sus características básicas son las siguientes:

- Colector De  $200 \text{ Cm}^2$ ;
- Robusto Y Fácil De Instalar;
- Cilindro De Zinc Plateado;

- Probeta graduada para lectura directa.



**Figura 15.**  
Pluviómetro tipo Hellmann de Lambrecht y probeta graduada para medición de la lámina de lluvia.



**Figura 16.**  
Pluviómetro de plástico graduado para medición de la lámina de lluvia.

La vida útil es de 10 años si se le brinda el cuidado y mantenimiento adecuado. mientras, el pluviómetro de plástico tiene una vida útil de 2 años, este es 5 a 10 veces más barato que el pluviómetro convencional tipo hellmann.

### *Pluviómetro con registrador de datos*

Este tipo de pluviómetro se caracteriza por almacenar los datos en una memoria digital, la cual se descarga cada 3 a 6 meses, el tiempo va a depender de la capacidad de la memoria y de la configuración de las lecturas. es un equipo, poco recomendado para establecer sistemas de alerta temprana ante inundaciones, ya que resulta impráctico.

Este tipo de equipo se recomienda para zonas de difícil acceso, a la cual se ve a visitar un o dos veces al año para realizar mantenimiento y recolección de la información. sin embargo, su información si es útil, al momento de elaborar los umbrales de lluvia o calibrar los modelos hidrológicos.

Sus características básicas son las siguientes:

- Colector de 200 cm<sup>2</sup>;
- Material anticorrosivo;
- Control por cubeta basculante o balancín;
- Registrador o Datalogger;
- Energía con batería de litio de 3.6 v;
- Capacidad de almacenamiento;
- Conexión a PC para descargar los datos;
- Software para leer los datos.



**Figura 17.**  
Pluviómetro con registrador digital de plástico y aluminio.

La vida útil es de 5 a 10 años; pero dependerá del mantenimiento. las baterías se deben cambiar cada 2 años aproximadamente.

### *Estación pluviométrica automática y transmisor GPRS*

Las estaciones de tipo meteorológico las hay de diversos tipos, y dependerá de las que puedan ser suministrados por proveedores o fabricantes. Muchas fábricas tienen representantes a nivel de latinoamérica. Información relacionada con estos pluviómetros puede ser consultada en sitios WEB.

Una estación automática meteorológica puede variar desde 1 sensor a varios, estos miden lluvia, temperatura, humedad relativa, radiación solar, velocidad y dirección del viento, temperatura de suelo, etc.

Sus características básicas son las siguientes:

- Registro de lluvias en tiempo real;
- Memoria de almacenamiento de 512 kb. (almacenamiento de 6 meses);
- Registros cada minuto;
- Transmisor GPRS;
- Panel solar y batería interna recargable;



Figura 18.

Estación automática y estación hidrológica automática de Cenizas fotografía de Saturnino Ordoñez. (Siquinalá, 2016). Archivos fotográficos de la red de estaciones de monitoreo meteorológico e hidrológico de INSIVUMEH. Guatemala.

La diferencia con los pluviómetros registradores, es que, transmiten la información vía gprs y la información llega a un servidor en tiempo casi real (con un retraso de 15 minutos). Este tipo de estaciones son ideales para establecer sistemas de alerta temprana ante inundaciones, ya que se pueden configurar para emitir un mensaje de alerta al alcanzar un determinado nivel de lluvia. También, existen en el mercado otro tipo de estaciones automáticas de menor costo; pero estos tienden a fallar al momento de presentarse eventos extremos, motivo por el cual no se recomiendan. La vida útil es de 5 a 10 años; pero dependerá del mantenimiento.

Entre mayor cantidad de sensores tenga una estación meteorológica el precio será mucho mayor que, si solo posee los sensores básicos.

## UBICACIÓN DE LAS MIRAS, ESCALAS O LIMNÍMETROS

También llamados miras o escalas graduadas, son miras graduadas de cm en cm, que se colocan en las márgenes de la corriente de agua para medir el nivel de ésta en un instante determinado.

Para su instalación es recomendable lo siguiente:

- Deben instalarse sobre la orilla más próxima al sector más profundo del cauce.
- Medir el nivel mínimo del río o quebrada durante la época seca. esta medición debe hacerse donde se va a colocar la escala;
- Considerar la accesibilidad de las personas responsables de la lectura;
- Colocar las escalas, miras o limnímetros sobre estructuras permanentes como puentes,
- Columnas de concreto u otro tipo de base;
- El nivel mínimo del río o quebrada debe coincidir con el punto cero y será a partir de éste donde se realizarán las lecturas;
- Se deben colocar en la parte alta, media y baja de la cuenca;
- Colocarlas en tramos rectos del río o quebrada sin curva por lo menos 100 metros aguas arriba y aguas abajo de la escala;
- Debe ubicarse abajo de la confluencia de dos o más afluentes;
- La sección del río (forma del perfil del lecho del río) debe ser la más estrecha;
- El río no debe desbordarse en este punto;
- La escala, mira o limnómetro debe ubicarse lo suficientemente alejado del sitio de respuesta (comunidad en riesgo de inundación);
- Preferiblemente no ubicarse muy cerca de la cabecera de los ríos.

### *Miras, escalas o limnímetros*

Los controles de nivel de un río pueden establecerse con un sistema de reglas o escalas limnimétricas. Generalmente vienen con marcas en centímetros. Las redes hidrológicas nacionales utilizan este tipo de medidor. La cantidad de reglas a utilizar por punto puede variar, éste dependerá del nivel de crecida que tienda a presentarse en dicha sección transversal del cauce.

Sus características básicas son las siguientes:

- Material anticorrosivo;
- Longitud de un metro por escala;
- Fácil de instalar y mantenimiento.

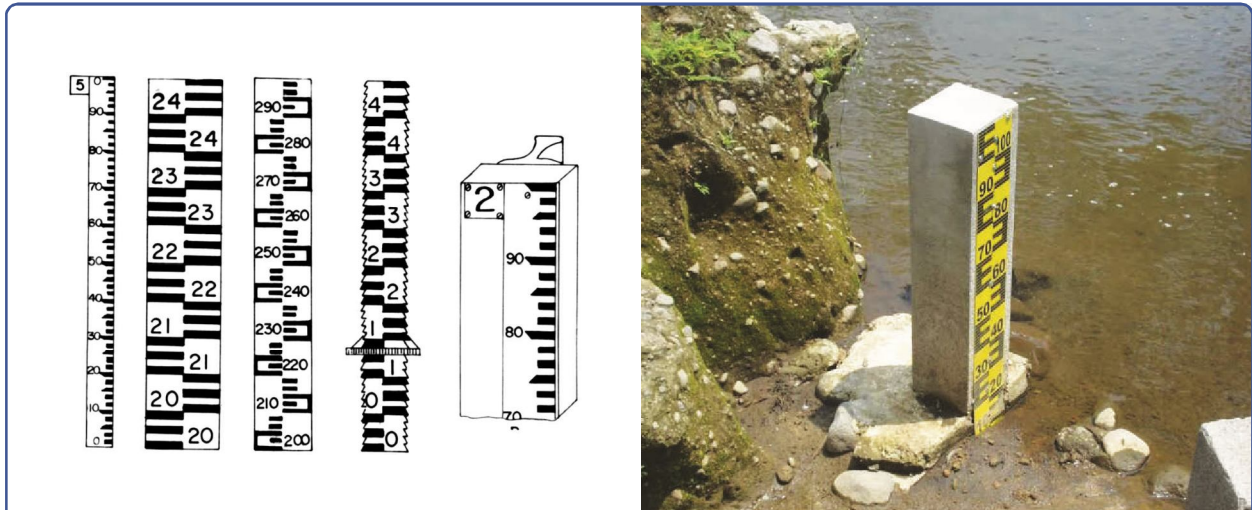


Figura 19.

Tipos de escalas limnimétricas y escala limnimétrica en la estación hidrológica Coatepeque fotografía de saturnino ordoñez. (coatepeque, 2016). Archivos fotográficos de la red de estaciones de monitoreo meteorológico e hidrológico de INSIVUMEH. Guatemala



Figura 20.

Escala limnimétrica de la estación hidrológica de Coatepeque fotografía de Saturnino Ordoñez. (Coatepeque, 2016). Archivos fotográficos de la red de estaciones de monitoreo meteorológico e hidrológico de INSIVUMEH. Guatemala

El costo dependerá de la calidad del material, al momento de instalarlas debe contemplar las estructuras en donde las pondrá, ya que si el lecho no es consolidado deberá de realizarse bases para poder instalarlas o empotrarlas, las dimensiones de las bases dependerán del caudal que deberá soportar, estas suelen instalarse en época seca para definir la escala mínima a la cual quedará instalada.

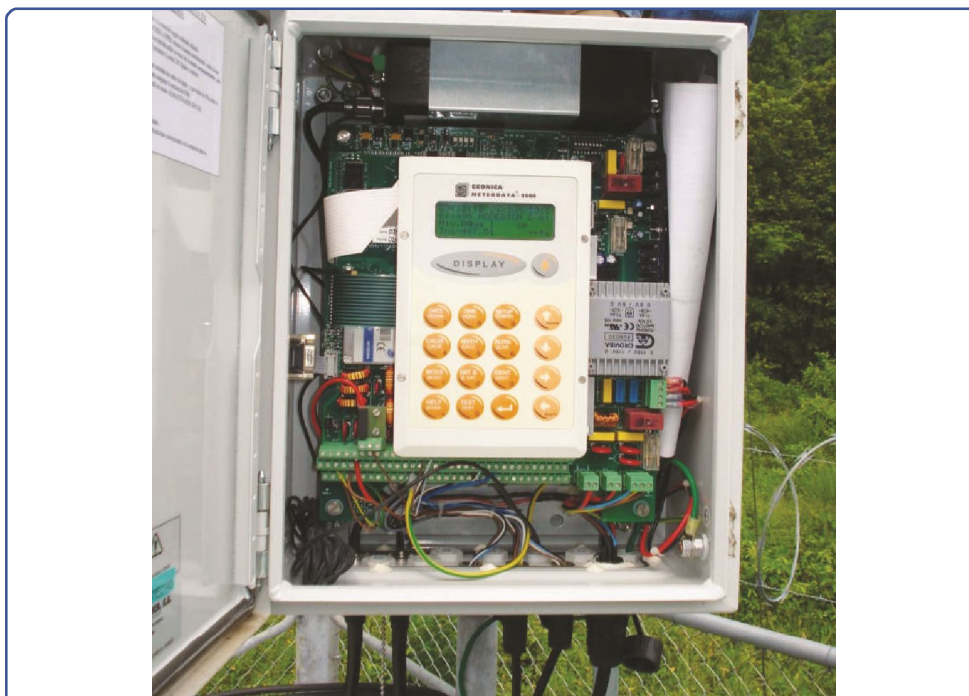
Se debe tener cuidado al momento de instalar varias escalas, ya que el inicio de la siguiente escala deberá coincidir con la finalización de la escala anterior, para poder tener una lectura continua y el error inducido por instalación sea mínimo, de esta forma la estimación de caudales será la correcta.

### *Sensor de nivel automático con registrador y transmisor GOES*

Los equipos automáticos de diversa variedad pueden ser suministrados por proveedores europeos y americanos. Sensores de nivel sumergidos y no sumergidos pueden ser una opción; registradores sencillos y robustos pueden ser incorporados, así como transmisión por celular o satélite, etc.

Las características básicas son:

- Plataforma colectora de datos con display;
- El sensor de medición del nivel de agua puede ser de presión, radar o burbuja;
- Registro de 16 mb (expandible);
- Comunicación a pc;
- Energía de 12 v;
- Transmisión de datos por GOES o GPRS.



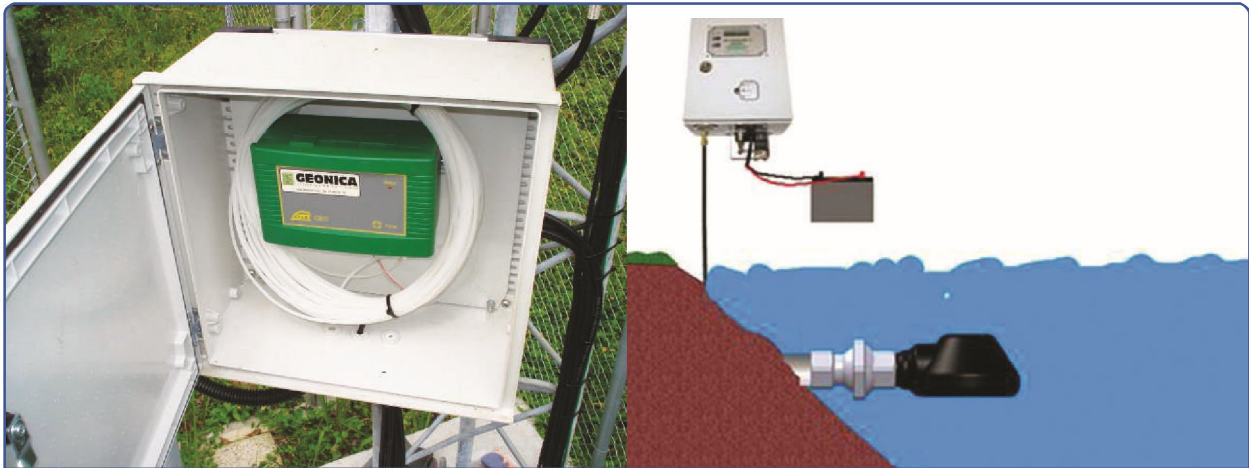
**Figura 21.**

Datalogger de la estación hidrológica automática fotografía de Saturnino Ordoñez. (Coatepeque, 2016). Archivos fotográficos de la red de estaciones de monitoreo meteorológico e hidrológico de INSIVUMEH. Guatemala



**Figura 22.**

Estación hidrológica automática con sensor de radar en la estación de Coatepeque fotografía de Saturnino Ordoñez. (Coatepeque, 2016). Archivos fotográficos de la red de estaciones de monitoreo meteorológico e hidrológico de INSIVUMEH. Guatemala



**Figura 23.**

Estación hidrológica automática Modesto Méndez con sensor de burbuja fotografía de Saturnino Ordoñez. (Modesto Méndez, 2016). Archivos fotográficos de la red de estaciones de monitoreo meteorológico e hidrológico de INSIVUMEH. Guatemala

### ***Sensor de nivel de río y pluviómetro empírico o artesanal***

Algunas instituciones de manejo de desastres a nivel de centro américa están trabajando en el diseño y construcción de pluviómetros y sensores de nivel que funcionan con un leed de colores para identificar umbrales de lluvia o del nivel del río y con alarmas sonoras.

Estos equipos comúnmente se integran a los sistemas de radio comunicación en la casa del voluntario y permite la facilidad de lecturas y toma de datos. Algunos requieren una fuente de energía (baterías).

Características básicas del sensor de nivel del río tipo SE-CONRED:

- Pieza longitudinal de 2-3 metros
- Contactos de nivel a cada 20-30 centímetros
- Leed con 10 señales,
- Energía 12 voltios



Figura 24.

Sensor de nivel de agua en el tramo de observación del río Coyolate, en Parcelamiento el Naranjo.

## EQUIPO AUTOMATIZADO

algunas oficinas de manejo de emergencias han identificado la importancia de apoyar los sat con equipos meteorológicos e hidrológicos automatizados, que registran datos en un registrador automático y que pueden transmitir los datos en tiempo casi real (retraso de 15 minutos).

Estos equipos deben ser resistentes a la intemperie, como los usados por los servicios hidrometeorológicos. existen algunos equipos menos sofisticados de menor costo. las funciones del utilizar equipo automatizado son: el monitoreo, el registro de datos para el análisis y calibración del sat y la validación del pronóstico.



**Figura 25.**

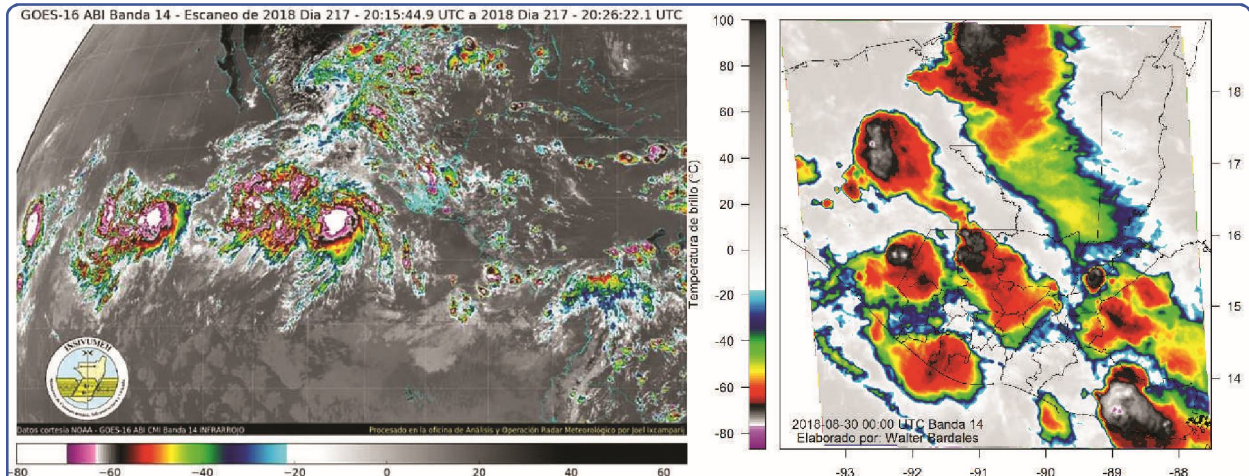
Estación hidrológica Puente Coyolate de INSIVUMEH sobre la ruta CA-2, de la cuenca del río Coyolate.

## SELECCIÓN DE EQUIPOS

Actualmente existen diversos tipos de equipos para registrar lluvias y niveles de ríos, desde artesanales hasta aquellos que utilizan tecnología satelital. Algunos SAT instalados en la década de los 90's utilizaron equipos caseros o fabricados por los mismos comunitarios. ahora se cuenta con medidores de lluvia de bajo costo, fabricados con material plástico. la selección del equipo está en función de la capacidad económica y de la densidad de la red de monitoreo que quieran establecer. sin embargo, se recomienda solicitar el apoyo de INSIVUMEH para determinar las características idóneas para la compra e instalación del sistema de monitoreo.

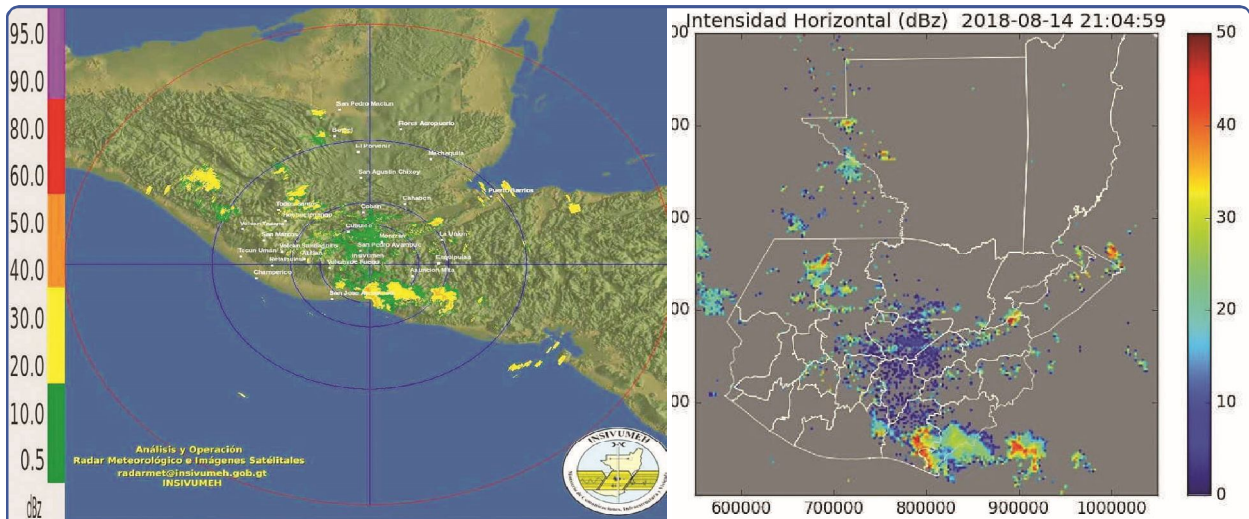
## INFORMACIÓN SATELITAL Y RADAR PARA MONITOREO DE LLUVIA

El uso de información satelital especializado y radar meteorológico permite la visualización del desplazamiento de tormentas o núcleos de tormenta. Además, se puede estimar las intensidades de lluvia y cantidad de lluvia que van dejando estos sistemas. Este tipo de información es de vital importancia al momento de tomar decisiones, para ello se debe tener contacto con la oficina de Análisis y Operación del Radar Meteorológico del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología o estar al pendiente de la información que se encuentra en la página web de la institución, siendo ésta la siguiente: [www.insivumeh.gob.gt](http://www.insivumeh.gob.gt)



**Figura 26.**

Estación hidrológica automática Modesto Némez con sensor de burbuja fotografía de Saturnino Ordoñez. (Modesto Méndez, 2016). Archivos fotográficos de la red de estaciones de monitoreo meteorológico e hidrológico de INSIVUMEH. Guatemala



**Figura 27.**

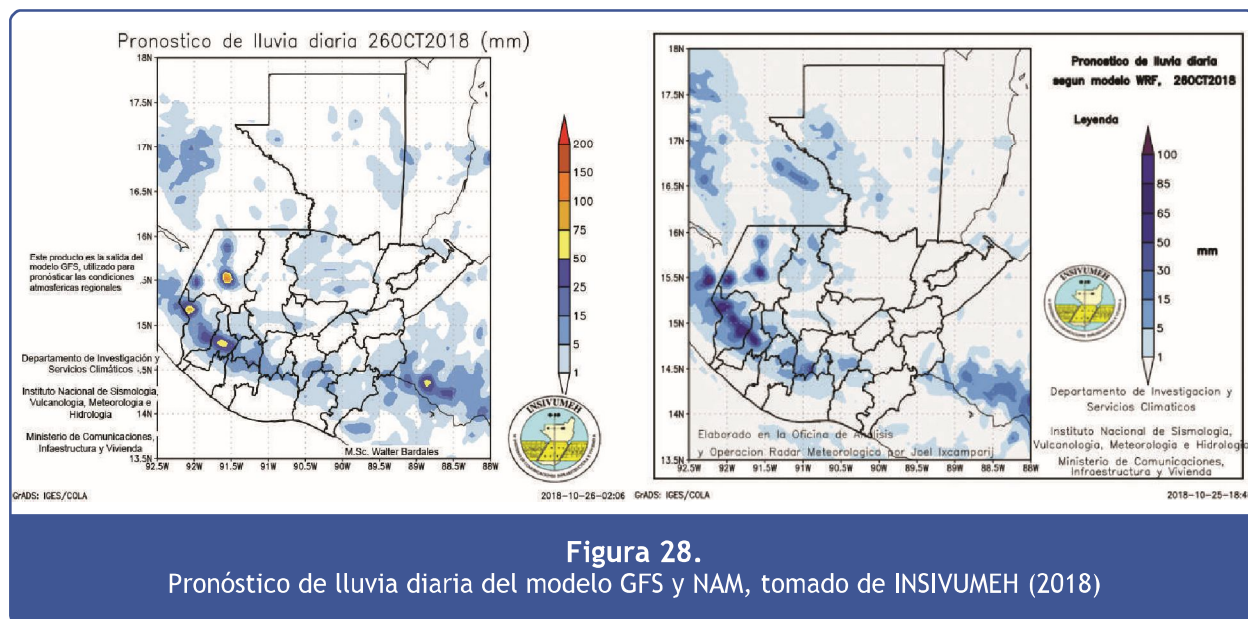
Imágenes de tormentas del radar meteorológico y estimación de la cantidad de lluvia del sistema tomadas de INSIVUMEH (2018)

## MODELOS DE PREDICCIÓN NUMÉRICA

El empleo de modelos numéricos de predicción meteorológica puede ayudar a identificar cuencas o áreas en las cuales existe alta probabilidad de ocurrencia de eventos de lluvia que sobre pasen los umbrales de alerta establecidos.

Este tipo de sistemas de pronóstico meteorológico permiten identificar un evento extremo con 48 a 72 horas de anticipación, tiempo en el cual ayuda a los comunitarios a prepararse para el monitoreo o evacuación de las comunidades susceptibles a inundaciones.

El INSIVUMEH publica en su página web información diaria de los pronósticos de lluvia de 24, 48 y 72 horas utilizando el modelo regional NAM y 24, 48, 72, 96, 120, 144, 168, 192, 216 y 240 horas utilizando el modelo global GFS, el cual es de acceso público; pero se pueden firmar convenios en la cual se obtengan productos especializados y de mayor detalle para la cuenca de interés.



## INSTRUCCIONES PARA LA LECTURA DE DATOS OBSERVADOS

Previo a ser instalados los equipos es necesario realizar una capacitación al personal comunitario que estará trabajando en la observación pluviométrica y limnimétrica, esta capacitación servirá para darle a conocer las funciones y atribuciones que deberán de realizar.

El encargado del sistema de alerta temprana ante inundaciones especificará las obligaciones de los observadores comunitarios. Dichas obligaciones deberán comprender la ejecución competente de las siguientes funciones:

- efectuar observaciones de lluvia y niveles con la exactitud requerida empleando los instrumentos adecuados;
- mantener los instrumentos y los emplazamientos de observación en buenas condiciones;
- efectuar un control de la calidad adecuado;
- codificar y despachar observaciones cuando no se disponga de sistemas de codificación y comunicaciones automáticos;
- mantener los dispositivos de registro y los registradores de datos electrónicos in situ,
- efectuar o verificar semanal o mensualmente registros de datos pluviométricos y limnimétricos, especialmente cuando no se disponga de sistemas automáticos o estos sean inadecuados, y
- proporcionar observaciones complementarias o auxiliares, cuando se esté en un evento de emergencia.

## LECTURA DE DATOS DE LLUVIA

Las mediciones se realizarán cada 15 minutos cuando inicie una tormenta muy intensa, si la lluvia es ligera, las mediciones podrán ser cada 30 o 60 minutos. Es importante que las lecturas se hagan con el horario local.

Cada día se cuantificará la lluvia total registra en 24 horas, esto se hará a las 7 de la mañana cada día de los 365 o 366 días del año, ya que esta información es de suma importancia, al momento de recalibrar los umbrales de lluvia.

Los pasos para leer el pluviómetro:

El observador deberá ver la escala del pluviómetro de plástico, si el pluviómetro es de tipo hellmann, el observador deberá vaciar el agua del recipiente de la probeta graduada, repetir el proceso hasta que haya terminado el agua del recipiente, luego suma todas las lecturas realizadas en la probeta, esto le dará el total de lluvia registrado.

Durante la operación del sat, es importante leer las lluvias en períodos determinados, para establecer las relaciones de lluvia-caudal. las lecturas pueden establecerse al inicio de una tormenta y al final de ella. esto se logra con un pluviómetro con registrador. Deben establecerse procedimientos de lectura en los “protocolos” con los lineamientos de cada caso.

## LECTURA DE DATOS DE NIVEL DE LOS RÍOS

Los protocolos deben indicar de forma clara, los procedimientos de lectura, hora de leer, etc., los niveles de los ríos. Deben incluirse procedimientos de inicio de toma de datos, que generalmente se hace una vez que se define que las lluvias son de un buen orden o por mensajes de la oficina de operaciones de emergencias al voluntario.

Los pasos mínimos para la lectura de niveles cuando el medidor o escala es de lectura directa son los siguientes:

- Leer el nivel en centímetros, ejemplo 24 centímetros (una vez establecido la presencia de lluvias en la cuenca alta);
- Anotar el valor en la boleta de datos en el día que corresponde, anotar hora, etc.;
- Trasladar el dato vía radio a la oficina central;
- Leer cada media hora o según lo indicado por el protocolo;
- Trasladar vía radio los datos cada media hora;
- Considerar las observaciones de la oficina de emergencias.

## CARÁCTER DE LA TOMA DE DATOS

Los pasos para establecer procedimientos de toma de datos pueden ser así:

- Datos de tipo seguimiento
- Datos de tipo normal

Los datos normales corresponden a aquellas lluvias y niveles del río que no representan posibles daños en la comunidad, por lo que no hay que tomar alguna decisión en la operación del SAT. Corresponden a los datos de la época seca. En este caso, se pueden seguir los procedimientos de lectura y anotación de datos establecidos.

Los datos de seguimiento se definen como aquellos importantes y que podrían relacionarse con probables inundaciones o toma de decisiones. La secuencia de toma de datos puede ser así:

- La entidad meteorológica da el aviso de presencia de un evento meteorológico; se requiere entonces que el voluntario, este atento y tome sus datos.
- La toma de datos puede ser de tipo horario o de menor tiempo según sea necesario.
- Tomar en cuenta todas las comunicaciones de la oficina de emergencia.

Para la operación de los sistemas de alerta de inundaciones es muy importante la integración del trabajo de la coordinadora nacional para la reducción de desastres y la oficina de pronósticos meteorológicos del INSIVUMEH. Se debe consolidar una interacción entre el sistema nacional de monitoreo meteorológico y los sistemas locales para lograr un desarrollo integral de mutuo beneficio.

Registro evento de lluvia		
Punto de observacion:		
Observador:		
Fecha		
Hora	Lectura (mm)	Observaciones
15	0	Inicio de la lluvia
16	2	
17	5	
18	25	
19	7	
20	12	
21	2	
22	1	Finalización de la lluvia

**Figura 29.**  
Ejemplo de la boleta de registro de eventos de lluvia en excel

Registro diario de lluvia		
Punto de observacion:		
Observador:		
Mes:		
Día	Lectura (mm)	Observaciones
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21		
22		
23		
24		
25		
26		
27		
28		
29		
30		
31		
Suma		
Max		

**Figura 30.**  
Ejemplo de la boleta de registro diario por mes en excel

### PROCEDIMIENTOS PARA GUARDAR LA INFORMACIÓN OBSERVADA

Las técnicas para almacenamiento de datos pueden ser muy variadas. Existen softwares específicos para el tratamiento de datos hidrometeorológicos y con procedimientos no complicados. El uso de hojas electrónicas es una herramienta de mucha utilidad hoy en día.

La ventaja de la hoja electrónica, es que se pueden obtener formas y procedimientos de cálculo de acuerdo a la intención del analista. Se sugiere para los SAT comunitarios el uso de la hoja electrónica de Excel, en donde los técnicos de las municipalidades o regionales de SECONRED puedan vaciar la información brindada por los voluntarios de las comunidades.

## INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS OBSERVADOS

Siendo el SAT una herramienta que cumple múltiples tareas, es conveniente que en el diseño y operación del mismo se tenga un hidrólogo que ayude y apoye las actividades del sistema, para el logro eficiente de los objetivos y éxito del mismo. El conocimiento hidrológico de la cuenca es muy importante en el SAT. Se ha mencionado ya en el tema del ciclo hidrológico, cómo intervienen los parámetros hidrometeorológicos (lluvia y escurrimiento), que son fundamentales en el monitoreo y pronóstico del sistema de alerta temprana.

Una vez diseñado el SAT, se tendrá la base para el pronóstico hidrológico; las series de datos históricos son muy importantes para poder entender el proceso de lluvia y escorrentía en la cuenca de análisis del sat.

Los datos observados, además de cumplir su función en el pronóstico y utilidad para la emisión de alertas de inundaciones, permiten validar las relaciones hidrológicas establecidas.

## DIFUSIÓN Y COMUNICACIÓN

En caso de una inundación es clave contar con información en tiempo real a fin de determinar los niveles de advertencia (aviso y alerta).

En los SAT que se han instalado en Guatemala, la información recopilada es transmitida mediante radios en la frecuencia de CONRED y verificada en el Centro de Transmisiones de Emergencia para la toma de decisiones.

El procesamiento y análisis de la información es fundamental pues permite tomar decisiones adecuadas y rápidas generando escenarios. Por ello es importante que el personal del centro de operaciones de emergencia y las personas que reciben la información en todos los niveles, cuenten con recursos humanos capacitados, con el conocimiento necesario para atender cualquier evento de inundación. es recomendable que el centro funcione las 24 horas y que el personal con el que trabaje tenga una baja rotación, lo que asegurará su conocimiento efectivo del sistema y las acciones a tomar. Además, se debe de elaborar un protocolo de alerta adecuado que permita escalar el nivel de acción de acuerdo a los efectos de inundaciones desde la escala más reducida (municipal, local) hasta el nivel nacional y que tiene que estar acorde al plan nacional de respuesta.

En el proceso de difusión de la alarma es importante que exista claridad en la definición de las instituciones responsables y de los protocolos establecidos, a fin de que la ruta a seguir se encuentre habilitada. Se debe tener en cuenta que el proceso no finaliza con la emisión de un pronóstico de crecida del río, sino que debe articularse al sistema CONRED de la región.

### DEFINICIÓN DE LOS CANALES DE COMUNICACIÓN

De acuerdo a la III EWC, las alertas deben llegar a las personas en peligro. Para generar respuestas adecuadas que ayuden a salvar vidas y medios de sustento se requieren de mensajes claros que ofrezcan información sencilla y útil. Es necesario definir previamente los sistemas de comunicación en los planos nacional, regional, municipal y local, y designar portavoces autorizados. El empleo de múltiples canales de comunicación es indispensable para garantizar que la alerta llegue al mayor número posible de personas, para evitar que cualquiera de los canales falle y para reforzar el mensaje de alerta. Usualmente debería de existir módulos o áreas de comunicaciones donde se recibe el mensaje de alerta y son responsables de brindar información a la autoridad máxima y, algunas veces, a los organismos de primera respuesta.

En cualquier SAT el proceso de difusión debe ser apoyado por los medios de comunicación, por los diferentes sectores y por las instituciones integrantes del sistema CONRED de la zona para la difusión de la alerta.

Otro punto que se debe tomar en cuenta cuando se definen los canales de comunicación, es la capacitación de los operadores de los equipos de comunicación a través de talleres, documentos

impresos, ejercicios prácticos, simulaciones de comunicación periódicamente para verificar si los equipos están funcionando y si las personas encargadas están atentas a los mensajes emitidos.

También es importante contar con la participación de la población en riesgo, pues en este proceso se debe saber si los sistemas de comunicación y difusión están habilitados de acuerdo a las necesidades de las comunidades, si son comprendidos, etc. a pesar de que los SAT en Guatemala cumplen con difundir la amenaza, muchas veces las poblaciones no son partícipes de la evaluación y adecuación de los mensajes que reciben en términos de género, edad, etnias, discapacidad, acceso a la infraestructura, diversidad económica, etc.

Si se recurre a alternativas tecnológicas como servicios de mensajes de texto o mensajes por internet, es necesario tomar en cuenta los mecanismos locales para la transmisión de la alarma, como campanas, sirenas, radio y televisión, y mensajeros para comunidades alejadas.

## SELECCIÓN DE EQUIPOS DE COMUNICACIÓN

Al realizar la selección del equipo de comunicación que se va a instalar es necesario contemplar lo siguiente:

- a. Identificar la entidad que se hará cargo del mantenimiento del equipo para garantizar su funcionamiento con el paso del tiempo.
- b. Es necesario que se adecue a las necesidades planteadas en el plan de respuesta.
- c. Si se requiere la implementación de radiocomunicación se debe de seguir las especificaciones del equipo que contempla el Departamento de Transmisiones de la Dirección de Logística de la SE-CONRED.
- d. Se debe incluir en los canales de comunicación a las autoridades locales quien serán los encargados del equipo.
- e. Para la comunicación de las alertas en las comunidades se debe diseñar un sistema que llegue a cada uno de los pobladores de la comunidad.

Los componentes básicos que conforman el sistema de radio comunicación son:

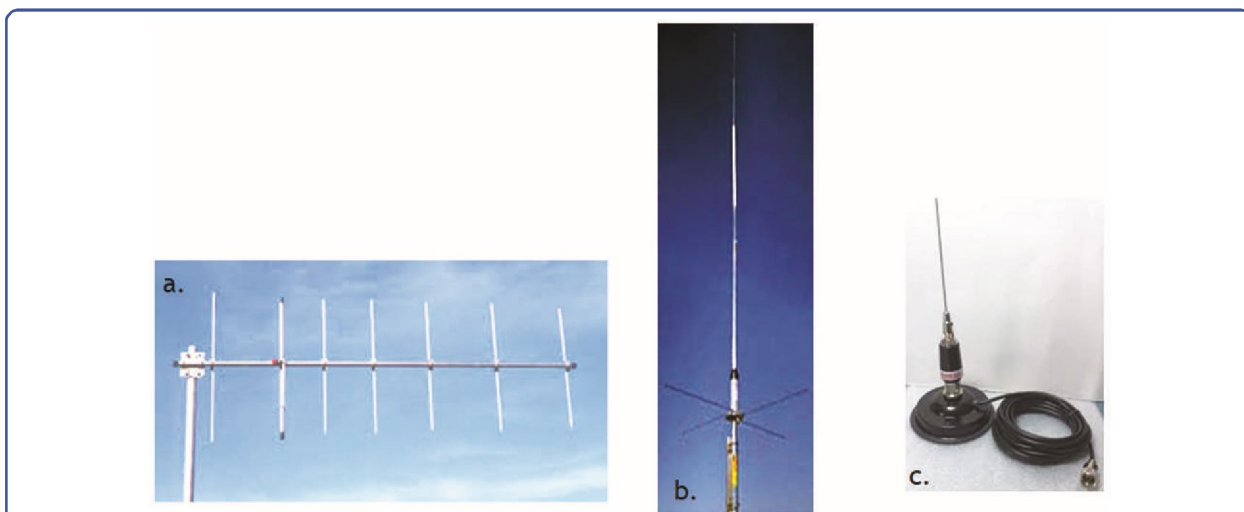
- a. Antena de recepción y transmisión
- b. Base de radio
- c. Panel solar
- d. Batería de ciclo profundo
- e. Regulador de voltaje



**Figura 31.** Componentes básicos del equipo de radio comunicación, tomado de CONRED (2019). Sistema de radio comunicación [diapositivas de PowerPoint]

Existen tres tipos de antenas en los sistemas de radio comunicación, siendo estas:

- a. Antena direccional de 6 elementos
- b. Antena omnidireccional G-7 150-1 marca Hustler
- c. Antena magnética omnidireccional de 5/8 y 1/4 de onda



**Figura 32.** Tipos de antenas, tomado de CONRED (2019). sistema de radio comunicación [diapositivas de PowerPoint]

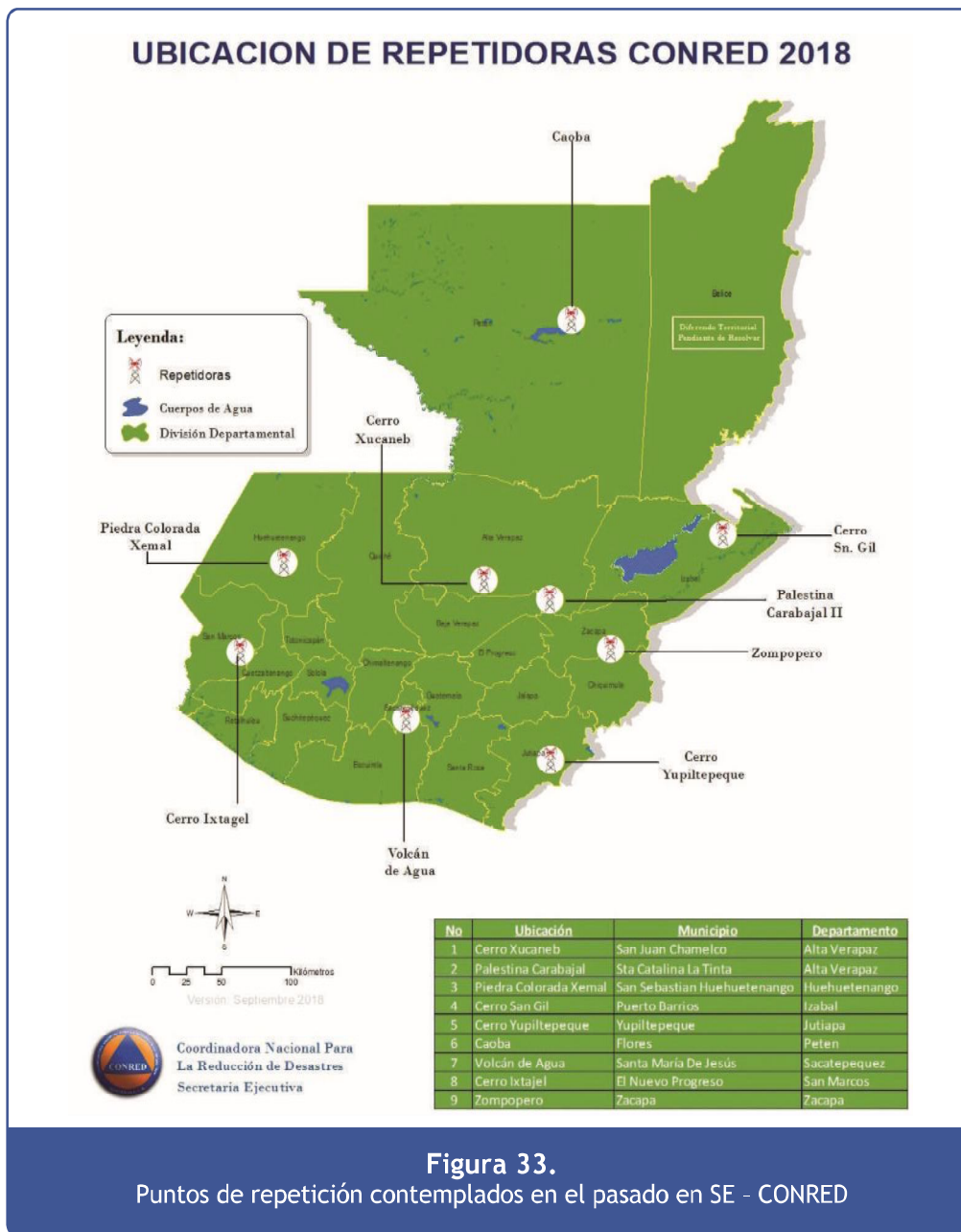
## SISTEMA DE RADIOCOMUNICACIÓN DE SE-CONRED

El sistema de radiocomunicación de SE-CONRED está diseñado para garantizar la comunicación en eventos de emergencia y es reconocido mundialmente como uno de los mejores canales de comunicación.

## SISTEMA DE REPETICIÓN

Los puntos de repetición sirven para expandir la cobertura de un sistema de radiocomunicación, existen modelos diseñados desde fábrica o aparatos construidos utilizando dos bases de radio. La repetidora es el único dispositivo en radiocomunicación en operar Full Dúplex (término utilizado en telecomunicación para definir a un sistema que es capaz de mantener una comunicación bidireccional, enviando y recibiendo mensajes de forma simultánea).

Para expandir la cobertura del sistema básico se instala un repetidor en un lugar alto y con buena visibilidad desde cualquier punto donde se quiere brindar cobertura. Cuando se diseñó el Sistema de Radiocomunicación de SE-CONRED se contempló el uso de 9 puntos de repetición que se indican en la Figura 33.



**Figura 33.**  
Puntos de repetición contemplados en el pasado en SE - CONRED

Cuando se contempla la implementación de bases de radio para la instalación de SAT, se deben realizar pruebas de comunicación para contemplar la necesidad de la instalación de un nuevo punto de repetición y de esa manera garantizar la comunicación eficiente.

## BASES DE RADIO

Las especificaciones de las bases de radio que se utilicen deben ser consultadas y consensuadas con el departamento de transmisiones de la dirección de logística de SE-CONRED. El departamento de transmisiones será el encargado de asesorar sobre el sistema de comunicación que se utilizará en el sistema de alerta temprana y esto debe de ser consultado durante el proceso de elaboración del proyecto para que el presupuesto abarque todo lo necesario.

A continuación, se muestran una base de radio y sus botones

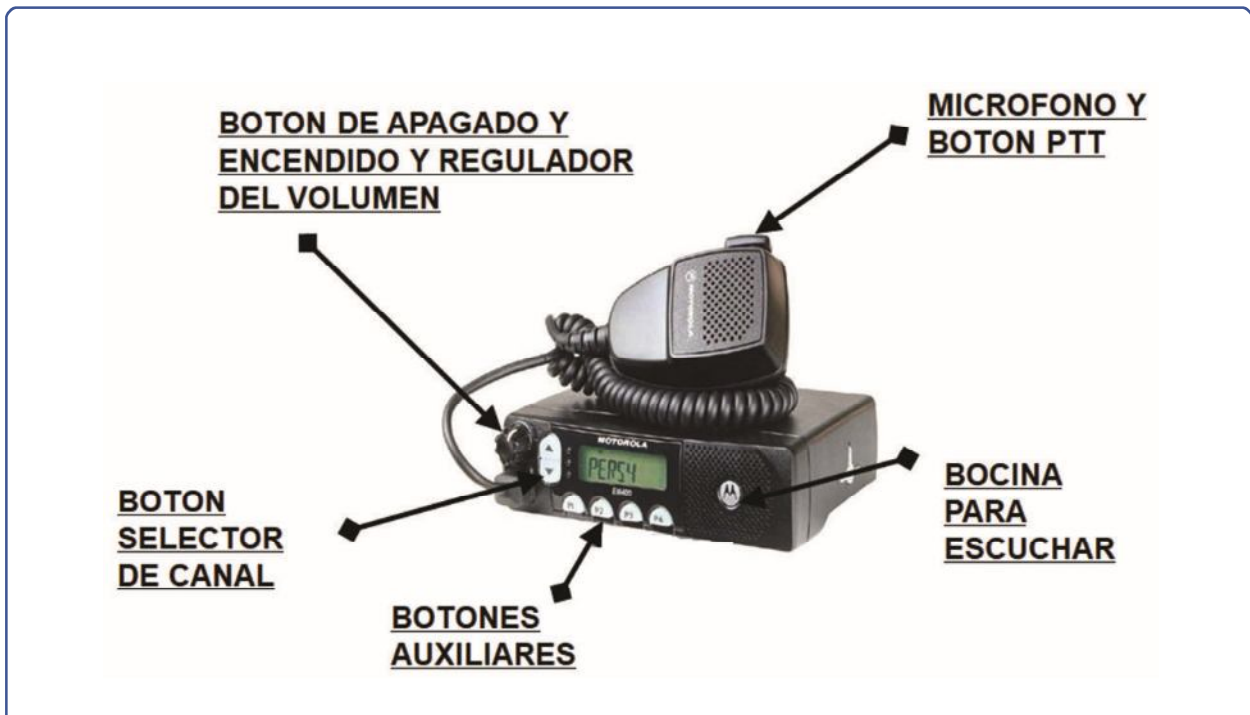


Figura 34.

Funciones de los botones de la base de radio, tomado de CONRED (2019). Sistema de radio comunicación [diapositivas de PowerPoint]

## CAPACIDAD DE RESPUESTA

### SISTEMA CONRED

La implementación de obras de mitigación puede reducir el impacto de la amenaza de inundación y puede reducirse el riesgo, pero no lo eliminan debido a que muchas de las comunidades se encuentran asentadas cerca de los cauces de los ríos o dentro de las llanuras de inundación de estos. El riesgo remanente implica la probabilidad de que se produzcan daños de magnitud proporcional a ese riesgo remanente y, por tanto, es necesario prepararse para enfrentar el impacto de inundaciones.

es necesario fortalecer la capacidad de respuesta de las comunidades en peligro con el fin de minimizar la pérdida de vidas y el impacto socioeconómico sobre sus bienes. A este conjunto de acciones se denomina preparación y se puede definir en tres componentes principales:

- a. Plan de respuesta
- b. Capacitación
- c. Recursos

Cuando ocurre una inundación, por lo general son las comunidades quienes tienen la gran responsabilidad de dar la primera respuesta ante las situaciones de emergencias. Por ello resulta importante que cada comunidad que es vulnerable cuente con planes de respuesta que le permita desarrollar acciones prácticas para prepararse para responder adecuadamente ante situaciones de emergencia recurrentes. Debido a esto, es necesario implementar Sistemas de Alerta Temprana centrados en la población con el objetivo de empoderar a los individuos, las comunidades amenazadas y las autoridades para tener la posibilidad de actuar a tiempo y de forma apropiada, de manera que se reduzca la posibilidad de pérdidas personales y daños en la propiedad.

El SAT debe responder y estar contextualizado con su entorno y las condiciones económicas, sociales y culturales de las comunidades a las que sirve. el esfuerzo tecnológico que significa debe ir acompañado de un mecanismo de difusión y de construcción de confianza en la población. Como todo sistema nuevo, tendrá dificultades primero para ser conocido y luego para ganar credibilidad por lo que es necesario poner esfuerzos y fondos en crear esta confianza.

Los SAT en toda su trayectoria, desde el mapeo y monitoreo hasta la toma de medidas, tienen que ser sostenibles. De nada sirven las estaciones de aviso río aguas arriba si la megafonía de aviso no funciona.

Los sistemas de alerta temprana deben tener un buen equilibrio tecnológico: ni ser tan simples que no cumplan su cometido ni tan complejos que no se puedan mantener sin ayuda externa.

Siendo las comunidades vulnerables, actores claves en el proceso de desarrollo local, son también elementos fundamentales para promover el proceso de la reducción del riesgo de desastres, llevando a cabo acciones tanto de prevención, como de preparación ante desastres. La experiencia muestra

que los esfuerzos para la reducción del riesgo que logran relevancia, efectividad y eficiencia, son aquellos en donde se dan procesos de concertación y negociación entre la población, sus dirigentes y sus autoridades. La falta de participación de la comunidad en cualquiera de estas etapas puede resultar en la no apropiación del sistema, lo cual pone en riesgo su sostenibilidad.

Para canalizar la participación de manera activa y organizada, de las comunidades en la operación de los SAT y todo el proceso de gestión del riesgo, desde la identificación y evaluación del riesgo, el diseño del SAT, el monitoreo de los indicadores, la colecta de datos, hasta la comunicación de la alerta y la respuesta, se hace necesario la organización comunitaria en torno a una coordinadora local de reducción de desastres.

Para que exista una participación comunitaria efectiva, es necesario tomar en cuenta las siguientes condiciones:

- a. Todos participan sin discriminación: todos los varones y las mujeres de la comunidad pueden integrar las diversas organizaciones sociales sin ningún tipo de discriminación por causa de género, religión, ideología, raza, etc.
- b. Escuchar y ser escuchados: debe crearse las condiciones favorables en la comunidad para escuchar y ser escuchados, lo que hará posible establecer un diálogo a fin de que la comunidad, una vez informada, tome la decisión más conveniente y pueda asumir sus compromisos.
- c. Respetar los acuerdos: una vez tomada la decisión de participar en una actividad o proyecto determinado, la comunidad debe asumir el liderazgo de la acción teniendo en cuenta los acuerdos de asamblea y los convenios asumidos o firmados.
- d. Organizados y coordinados: los líderes, dirigentes y autoridades de la comunidad deben realizar trabajo en equipo, actuando de forma coordinada con las instituciones públicas y privadas.
- e. Manejar los conflictos: en caso de conflictos nuevos o ya existentes, estos deben de ser abordados mediante el diálogo y con el debido respeto a los acuerdos comunitarios.

Otro elemento importante que puede fortalecer la capacidad de respuesta es fomentar la autoprotección que es toda acción y medida que se toma individualmente o que toman las comunidades y las organizaciones y que tienen por finalidad proteger la vida de estos.

Una de las principales medidas de autoprotección es la preparación ante una emergencia que permite conocer sobre las amenazas y tomar las medidas y decisiones necesarias de forma anticipada para evitar un riesgo o disminuir sus efectos.

## PLAN NACIONAL DE RESPUESTA

El Plan Nacional de Respuesta -PNR- de la República de Guatemala establece las acciones de coordinación a nivel nacional de acuerdo a las estructuras organizativas para brindar una respuesta ante emergencias y desastres de forma escalonada, el mismo establece los siguientes ejes de acción:

- a. Estructura organizativa para atender situaciones de riesgo, emergencia o desastre situación -RED-
- b. Definición de funciones y responsabilidades de las secciones funcionales.
- c. Establece los mecanismos de coordinación para manejar emergencias o desastres.

En el plan nacional de respuesta se describen las metodologías para que las coordinadoras para la reducción de desastres asistan a la población durante emergencias y desastres, y de esa manera se pueda proporcionar la atención inmediata mediante la aplicación de los procedimientos de intervención y facilitar la pronta recuperación. De esta manera se busca aprovechar al máximo los recursos y evitar la duplicidad de esfuerzos.

Para comprender a profundidad el Plan Nacional de Respuesta elaborado por SE - CONRED, puede visitar su página web o la dirección directa <https://www.conred.gob.gt/www/documentos/planes/Plan-Nacional-de-Respuesta.pdf>.

## **ORGANIZACIÓN DE COORDINADORAS**

En el año 2004 la Secretaría Ejecutiva de la Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres, con el apoyo financiero de la Comunidad Europea, publicó el Manual para la Organización de las coordinadoras para la reducción de desastres; como una herramienta para fortalecer el proceso de organización en los diferentes niveles territoriales y contribuir a la descentralización mediante la garantía del manejo integrado de los desastres, al otorgar funciones y responsabilidades a los distintos actores sectoriales y niveles territoriales del país.

El Manual de Organización de Coordinadoras para la Reducción de Desastres se establece como un documento que contiene en forma ordenada y sistemática la información e instrucciones sobre el marco jurídico administrativo, atribuciones, organización, objetivo y lineamientos estratégicos de las mismas; constituyéndose en un instrumento de apoyo administrativo, que describe las relaciones orgánicas que se dan entre los elementos de la estructura organizacional, los niveles y los actores con los cuales interactúa.

El objetivo del manual es proporcionar la información básica de la organización de las Coordinadoras para la Reducción de Desastres, funcionamiento, estructura, competencia territorial, para lograr el desarrollo y funcionalidad del sistema escalonado de reducción de desastres.

Este proceso debe de ser coordinado con la dirección de preparación de la SE-CONRED y debe registrarse sus lineamientos.

En el caso de Coordinadoras que integren Sistemas de Alerta Temprana se debe desarrollar un módulo más para que todos los integrantes comprendan el funcionamiento del mismo.

El contenido mínimo de este módulo se describe en el siguiente cuadro:

SESIÓN	CONTENIDO	TIEMPO
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Conocimiento del Riesgo               <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Identificación de Amenaza</li> <li><input type="checkbox"/> Grado de exposición y susceptibilidad</li> <li><input type="checkbox"/> Elaborar el croquis comunitario: identificar zonas de riesgo y señalar rutas de evacuación</li> </ul> </li> </ul>	60 min.
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Servicio de seguimiento y alerta               <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Sistema de Monitoreo (Definición de parámetros “normales”)</li> <li><input type="checkbox"/> Alertas oportunas y toma de decisiones</li> </ul> </li> </ul>	60 min.
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Difusión y comunicación               <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Comprensión de las alertas</li> <li><input type="checkbox"/> Metodología para difusión de la alerta a todas las personas en peligro. (Bases de radio, flujo de llamadas)</li> <li><input type="checkbox"/> Alarmas (Sirenas, flujo de llamadas)</li> </ul> </li> </ul>	60 min.
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Capacidad de Respuesta               <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Toma de decisiones</li> <li><input type="checkbox"/> Procedimiento de evacuación (con ejercicio de evacuación, definición de puntos de reunión, comisión de evaluación, comisión de control y registro, identificación de grupos vulnerables, comisión de apoyo psicosocial, etc.)</li> </ul> </li> </ul>	60 min.
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Ejercicio de Simulación y simulacro</li> </ul>	

## OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

La operación del sistema consiste en que este funcione adecuadamente.

El mantenimiento de un SAT ante inundaciones consiste en la revisión y verificación del funcionamiento de la infraestructura e instrumental, el cual debe realizarse en forma permanente, es indispensable para el buen funcionamiento del registro de parámetros meteorológicos e hidrológicos buenos, y para la emisión de alertas y difusión de la información se requiere de un buen funcionamiento del sistema de radio comunicación.

El mantenimiento se divide en:

- a. **Mantenimiento preventivo:** este consiste en una inspección de la infraestructura y equipo con el objeto de prevenir averías y prolongar el tiempo de disponibilidad y de buen funcionamiento del equipo, así como de mantener el buen estado toda la infraestructura.
- b. **Mantenimiento correctivo:** es aquel que corrige los defectos observados en los equipamientos o instalaciones, esto se realiza mediante reparaciones o cambios de equipamiento por uno nuevo, debido a que la vida útil caduco.

Se recomienda realizar las verificaciones del buen funcionamiento de todo el sistema 2 meses antes de que inicie la época lluviosa.

### INFRAESTRUCTURA METEOROLÓGICA O HIDROLÓGICA

Se debe verificar que la malla, los postes, puerta y el alambre de púa que protegen el área de la estación pluviométrica o hidrométrica, estén siempre en buen estado para garantizar la integridad de los instrumentos instalados en su interior.

Se debe realizar la limpieza del área interna como la circundante a la estación por lo menos dos veces al mes, eliminando malezas y cualquier otro objeto ajeno a los instrumentos meteorológicos e hidrológicos.

### PLUVIÓMETRO O PLUVIÓGRAFO

Se debe verificar que el pluviómetro este bien sujeto al pedestal, la posición del mismo sea vertical y este nivelado tomando en cuenta para esto la boca superior del pluviómetro, tanto para la nivelación como la altura a la cual debe estar instalado que es 1.50 metros de la superficie del suelo.

Verificar si no presenta pérdidas de agua por daños o deterioro que tenga el instrumento, en dado caso sea si, este se deberá ser remplazado por uno nuevo. se recomienda que este se revise cada mes, para evitar que sea obstruido por hojas o insectos.

Verificar que las plumillas graficadoras estén en buen estado, de no ser así se debe notificar a la oficina regional para hacer él envío respectivo de las mismas. el cambio de bandas

del pluviógrafo, debe ser realizado con el máximo cuidado, para evitar romper el sifón de vidrio en caso de equipo convencional.

## PLUVIÓMETROS DIGITALES

El intervalo de tiempo por el cual debemos revisar el pluviómetro debe de ser una vez al mes ya que en ocasiones cualquier desecho como hojas de árbol, insectos, polvo o ramas pueden taponar el embudo. Es conveniente además calibrar el embudo cada año o bien comprobar que funciona correctamente. Podemos hacer una comparación con otros pluviómetros que se encuentren cercanos al nuestro y comparar los niveles, esto nos puede dar una idea, aunque las lluvias pueden ser diferentes si están alejados.

## BATERÍAS

Utilice siempre baterías de marcas conocidas. Anticípese a cambiar las baterías cada 2 ó 3 años, depende de cada estación meteorológica, hidrométrica o sistema de radio difusión. Utilice baterías de ciclo profundo.

- Limpiar la parte superior de la batería, regularmente. Tal vez es conveniente que cubrirla.
- Limpiar y engrasar las patillas de conexión de la batería para evitar la corrosión. Si hubiese corrosión ya es recomendable cambiar las patillas.
- Verifique las instrucciones y consejos del fabricante de baterías.
- Si nota algún posible problema con el voltaje compruébelo con un voltímetro, los valores deberían circular entre 11.5 a 13.5 voltios. si estuviese fuera de esos valores habría un problema con el panel solar que recarga batería o tal vez la batería este defectuosa.

## PANEL SOLAR

Orientación, dependiendo de la estación del año nos conviene una orientación u otra. Siempre debe estar orientado hacia el sur (en el hemisferio norte), habría que asegurarse que siempre el sol le da de lleno y no hay nada que le de sombra.

Vidrio del panel solar. revisar frecuentemente, limpiarlo con un trapo suave o esponja y ligeramente húmedo. si hay polvo, reducirá la energía captada del sol. No utilice nunca productos abrasivos, paños rugosos que puedan arañar la superficie. En caso de duda mejor solo sopla el cristal o utilice un papel de limpiar la casa o la cocina.

Revisar voltaje. Es posible que el fabricante recomiendo otra cosa, pero si puede compruebe la tensión con un voltímetro, lo normal es que este entre 11.5 y 14.5 v. No invertir los cables verificar el (+) positivo y el (-) negativo.

Evitar en lo posible el que este cerca de árboles.

## **ESCALAS LIMNIMÉTRICAS**

Se debe revisar las bases de las reglas que no se encuentre socavada, los tornillos que sujetan la regla deben estar en buen estado y la calidad de las reglas. En caso que estos estén dañados, se deberán de cambiar.

## **POZOS DE LIMNIMETROS**

Se debe revisar que estos estén libres de sedimento, en caso contrario limpiarlos.

## **SENSOR DE NIVEL**

El principio de funcionamiento es que el sensor emite una señal perpendicular a la superficie del agua y usa la señal reflejada para calcular la distancia. La distancia exacta entre el sensor y la superficie del agua es calculada por el procesador.

Manipular el sensor con cuidado debido a que es un instrumento de precisión, usar un nivel de burbuja para alinear la cubierta con la superficie del agua y revisar el cable de conexión del sensor, en caso de estar dañado cambiarlo.

## **SISTEMA DE RADIO COMUNICACIÓN**

Verificar que este en un lugar seco ventilado y a la vista de las personas operadoras, no ponerle recipientes con líquidos encima ni golpearlos, estar en el canal correspondiente salvo indicaciones, las conexiones de corriente eléctrica deben estar limpias y sin daños, la antena debe estar bien anclada sin topar arboles laminas u otros y no presentar daños y durante una tempestad se deberá apagar el equipo y desconectar la antena.

## **REGULADOR DE VOLTAJE**

Anclarlo de forma segura para que no se mueva, no invertir los cables, verificar el (+) positivo y el (-) negativo, no golpearlo y evitar el que le caigan líquidos. Cuando ya no funcione, se recomienda cambiarlo.

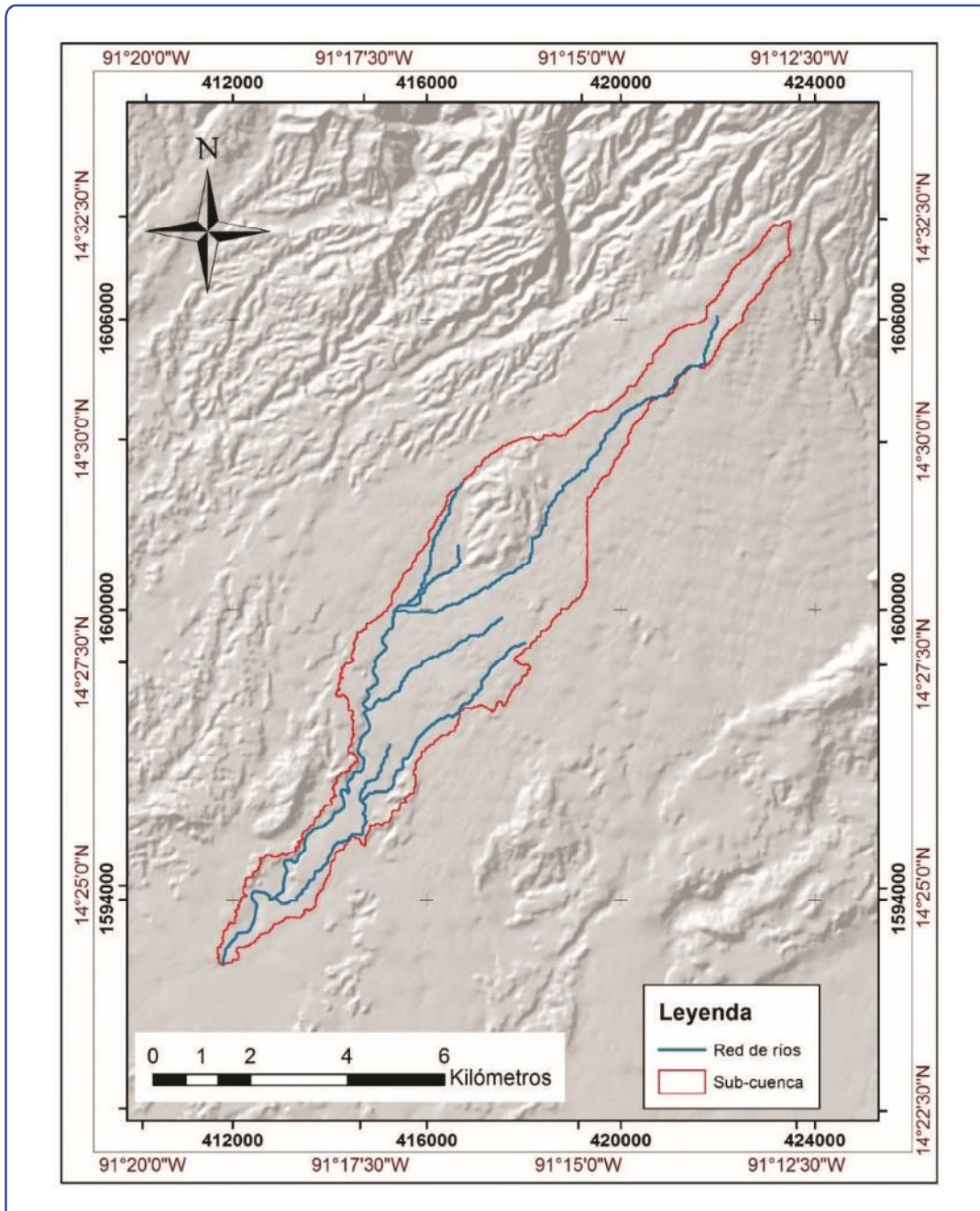
## **ANTENAS**

Revisar que el mástil este bien anclado, revisar que el cable no este colgando ni desconectado al radio base, revisar que está completa la antena y que este bien direccionada (depende del tipo de antena).

## ESTUDIOS DE CASOS

### CASO SUB-CUENCA SAN FRANCISCO

La Sub-cuenca San Francisco se encuentra en la parte media de la cuenca Nahualate, está ubicada entre las coordenadas geográficas 14°24' y 14°32'30" de latitud Norte y de -91°12'30" y -91°19' de longitud Oeste.



**Figura 35.**  
Mapa de ubicación de la Sub-cuenca San Francisco y la red de ríos.

## CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA

La sub-cuenca San Francisco tiene un área de 30.02 km<sup>2</sup> y un perímetro de 60.6 km, el cauce principal tiene una longitud de 30.02 km y es de tercer orden, la longitud media de corrientes es de 4.3 km, el radio de bifurcación media indica que por cada 2 ó 3 corrientes hay una corriente de orden superior, el radio de longitud media es de 0.33 indicando que a cada 1.4 km (4.3 km \* 0.33) de longitud existe una bifurcación, la longitud acumulada de corrientes es de 40.52 km y en total existen 9 corrientes con un área mínima de flujo acumulado de 1 km<sup>2</sup>.

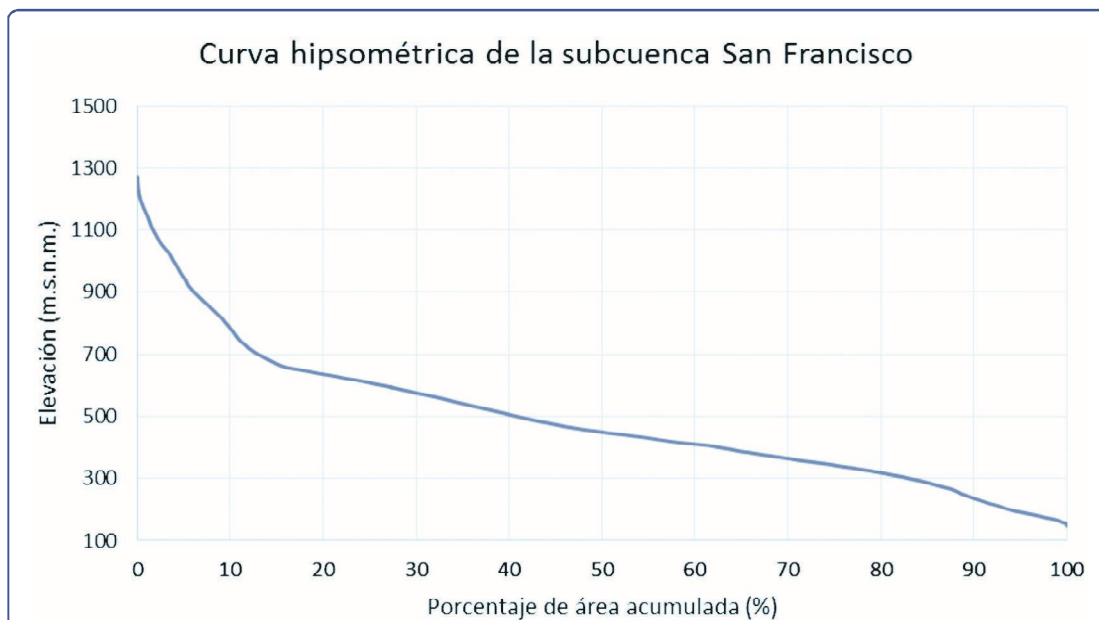
La relación de la forma es menor de 0.3, indicando que la sub-cuenca presenta una forma alargada, la relación de forma circular indica que la cuenca no tiene forma cuadrada o circular, y el índice de compacidad indica que es una cuenca alargada al igual que el índice de elongación. La densidad de drenaje indica que por cada kilómetro cuadrado de área hay 1.35 km de longitud de cauce, y a su vez indica que la sub-cuenca presenta un buen drenaje, la frecuencia o densidad de corrientes es baja. El índice de torrencialidad de la sub-cuenca es bajo, por lo que la respuesta a una crecida está dada por el tiempo de concentración, siendo este de 101.4 minutos, mientras el tiempo de retardo es de 60.6 minutos.

El coeficiente orográfico, relieve y robustez indican que la sub-cuenca es fuertemente accidentada a escarpada, y el coeficiente de masividad indica que es una sub-cuenca moderadamente montañosa. la pendiente media de la cuenca la clasifican como accidentado. Estas características favorecen la formación de derrumbes, erosión hídrica y escorrentía, las cuales pueden ser limitadas o potencializadas por la geología, tipos de suelo, cobertura del suelo y la lluvia.

la sub-cuenca se encuentra entre los 147 m.s.n.m y 1272 m.s.n.m, la altura media es de 490 m.s.n.m, la amplitud de elevación es de 1125 m. Esta sub-cuenca se localiza en la parte media de la cuenca.

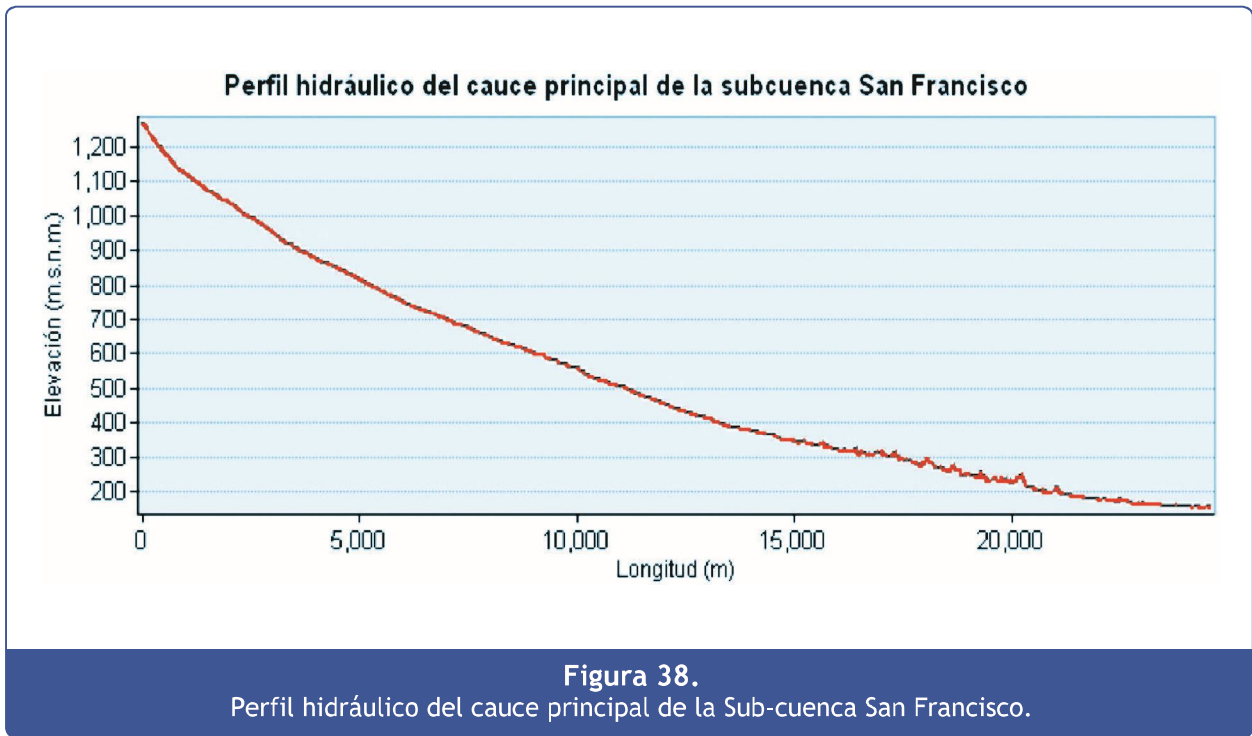
Aspectos lineales			Aspectos de relieve		
a. Perímetro	60.6	Km	a. Coeficiente orográfico (Co)	0.01	Adimensional
b. Orden de corrientes	3	Adimensional	b. Coeficiente de relieve (Rh)	0.006441	Adimensional
c. Longitud media de corrientes (Lu)	4.3	Km	c. Coeficiente de robustez (Rr)	22.5	Adimensional
d. Radio de bifurcación medio (Rb)	2.5	Adimensional	d. Coeficiente de masividad (Km)	16.3	Adimensional
e. Radio de Longitud media (Rl)	0.33	Adimensional	e. Tiempo de concentración de Kirpich	101.4	Minutos
f. Longitud acumulada de corriente (La)	40.52	Km	f. Pendiente media de la cuenca (Sc)		
g. Longitud del cauce principal (Lcp)	24.56	Km	(i) Mínimo	0	%
Aspectos de área			(ii) Máximo	100.2	%
			(iii) Promedio	10.3	%
a. Área de la cuenca (Ak)	30.02	Km <sup>2</sup>	(iv) Desviación estándar	8.6	%
b. Forma de la cuenca:			g. Pendiente del cauce principal (Scp)		
(i) Relación de la forma (Rf)	0.05	Adimensional	(i) Mínimo	0	%
(ii) Relación de la forma circular (Rc)	0.103	Adimensional	(ii) Máximo	85	%
(iii) Índice de compacidad o de Gravelius (Kc)	3.12	Adimensional	(iii) Promedio	13.4	%
c. Radio de elongación (Re)	1.98	Adimensional	(iv) Desviación estándar	12.9	%
d. Densidad de drenaje (D)	1.35	Km/Km <sup>2</sup>	h. Elevación media (Elev)		
e. Frecuencia o densidad de corrientes (Fc)	0.3	Corrientes/Km <sup>2</sup>	(i) Mínimo	147	m.s.n.m.
f. Coeficiente de torrencialidad (Ct)	0.2	Corrientes (1) /Km <sup>2</sup>	(ii) Máximo	1272	m.s.n.m.
			(iii) Rango	1125	m.s.n.m.
			(iv) Promedio	490	m.s.n.m.
			(v) Desviación estándar	215.7	m.s.n.m.

**Figura 36.**  
Resumen de los aspectos morfométricos de la Sub-cuenca San Francisco



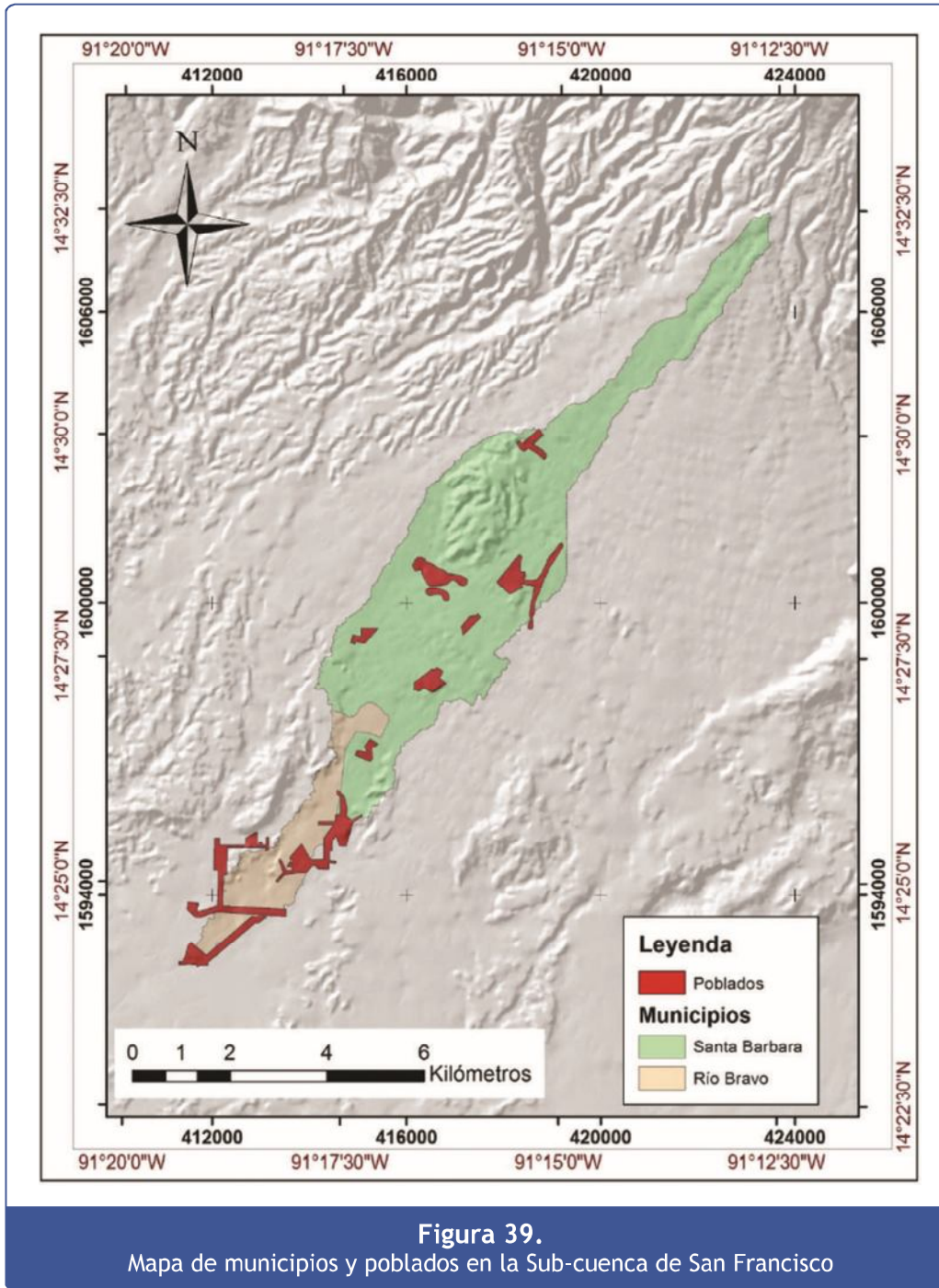
**Figura 37.**  
Curva hipsométrica de la Sub-cuenca San Francisco.

El cauce principal presenta una pendiente media de 28.7 %, la pendiente mínima es de 0 % y la máxima es de 166.2 %. Al observar el perfil hidráulico del río san francisco en la subcuenca, en los primeros 15000 m tiene alta pendiente, conforme va disminuyendo la elevación las pendientes son menores. Este cauce va a tener degradación en las partes altas, el lecho del río serán rocas, a medida que desciende depositará piedras o cantos rodados y arenas.



## POBLADOS

Según los datos del ine (2002), la Sub-cuenca San Francisco tiene 4 poblados que pertenecen a río bravo (suchitepéquez), siendo estos: La Capital, La Cortina, San Antonio las Flores y Santa Elena. Y 6 poblados que pertenecen a Santa Bárbara (Suchitepéquez), siendo estos: El tesoro, La distracción, Ofelia, San Joaquín, San José el Carmen y San Rafael Panán, estos se localizan a en las márgenes de la red fluvial.



## USOS DE LA TIERRA

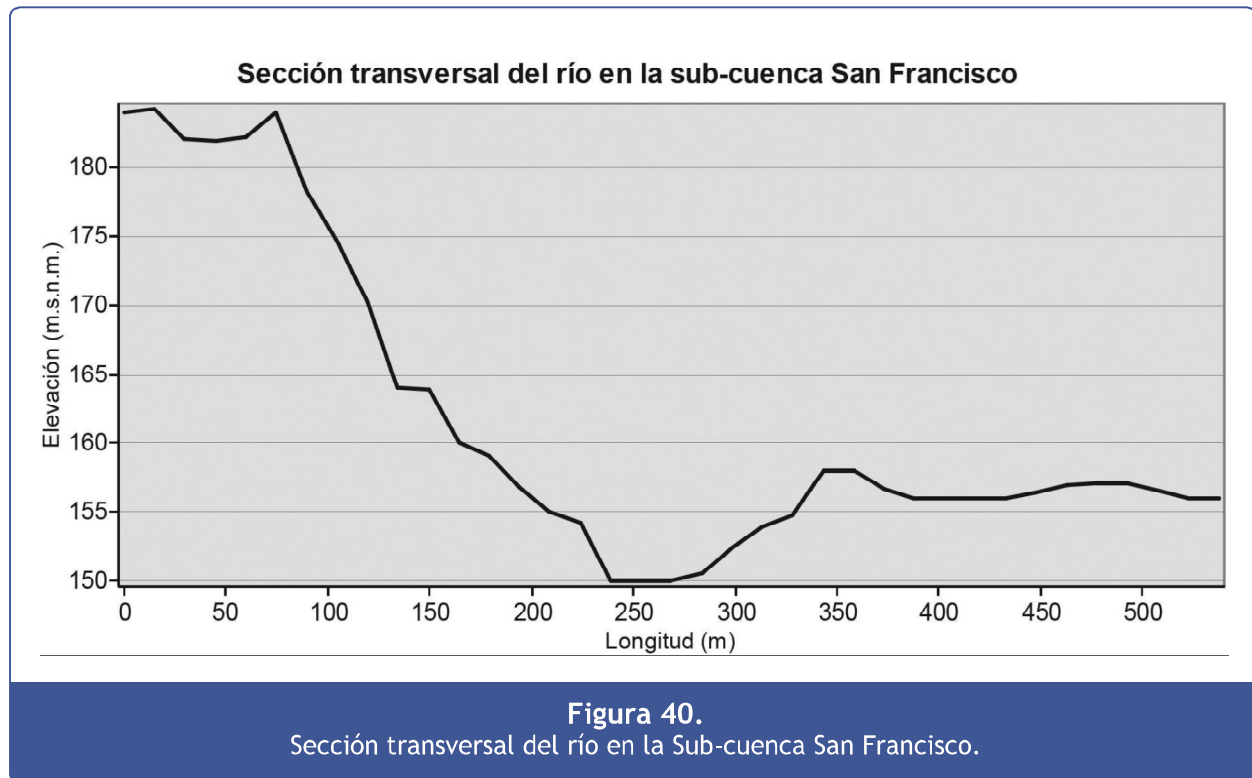
Según el MAGA (2015), el uso del suelo en la sub-cuenca, es el siguiente: el bosque latifoliado ocupa el 9.7 % de la superficie de la sub-cuenca (2.91 km<sup>2</sup>), el cultivo de café con el 5.86 % (1.76 km<sup>2</sup>), el cultivo de macadamia con el 3.53 % (1.06 km<sup>2</sup>), el cultivo de cítricos con el 1.2 % (0.36 km<sup>2</sup>), el cultivo de caña de azúcar con el 33.69 % (10.11 km<sup>2</sup>), el cultivo de hule con el 28.02 % (8.41 km<sup>2</sup>), huertos con el 1.93 % (0.58 km<sup>2</sup>), pastos cultivados con el 12.03 % (3.61 km<sup>2</sup>), zona de río con el 0.77 % (0.23 km<sup>2</sup>), el tejido urbano continuo el 1.83 % (0.55 km<sup>2</sup>) y la vegetación arbustiva baja (matorral y/o guamil) el 1.43 % (0.43 km<sup>2</sup>).

## TEXTURA DEL SUELO

Según MAGA (2013) y Simons et. al. (1959), la sub-cuenca presenta 3 clases texturales; siendo: la textura franco-arcillo-arenoso con un área de 0.55 km<sup>2</sup> que representa el 1.82 % de la sub-cuenca, la textura franco-arenoso con 25.61 km<sup>2</sup> (85.3 %) y la textura franco-limoso con 3.86 km<sup>2</sup> (12.87%). Estos suelos presentan una velocidad de drenaje interno que los clasifica de moderado a muy rápidos, la profundidad efectiva es mayor a 50 cm., y son buenos a regulares retenedores de humedad.

## DINÁMICA FLUVIAL

La evolución de la red de cauces para la Sub-cuenca San Francisco corresponde a un estado maduro a vejez, el cual está conformado por valles amplios, pendientes bajas a muy bajas y cauces anchos. El patrón de alineamiento del drenaje es dendrítico, el valle que forma son grandes planicies, son secciones capaces de transportar todo el material erosionado durante una crecida, conforme disminuye la crecida depositan material conformando una geología aluvial. El patrón de alineamiento que tiene el cauce es recto a sinuoso en las partes altas y meandro a trezado en la parte baja de la sub-cuenca. Debido a la capacidad de erosionar el fondo y las orillas la condición de estabilidad se clasifica como dinámica, presenta alto desarrollo de llanuras de inundación, generalmente por deposición de material rellenando el cauce de material, por lo general la banca llena tiene una altura de 5 m, esto expone a las comunidades que se encuentran a lo largo del cauce San Francisco.





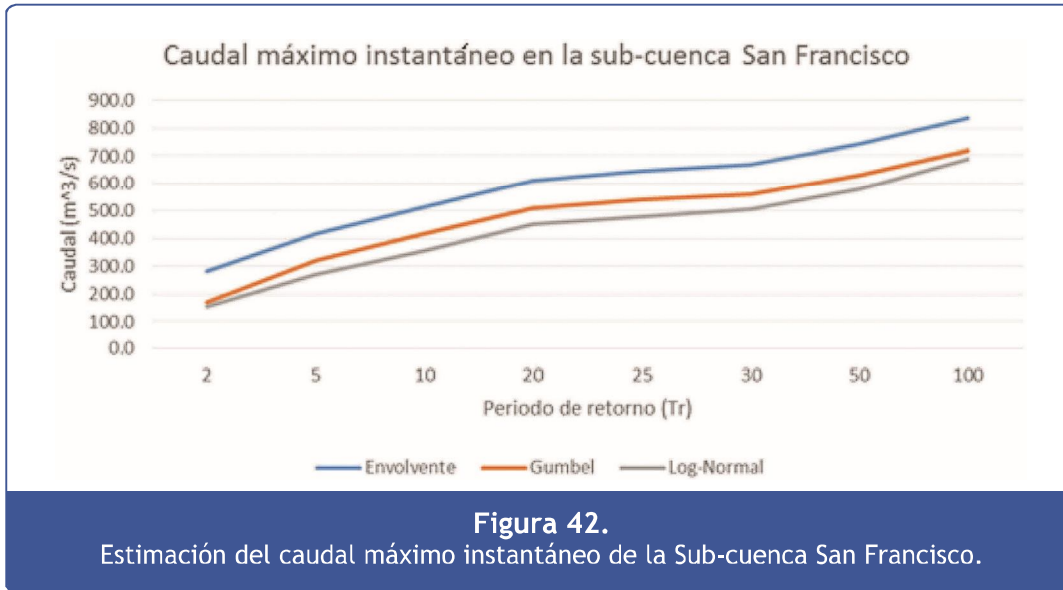
**Figura 41.**  
Vista de planta en el punto de aforo de la Sub-cuenca San Francisco.

## CLIMATOLOGÍA

La sub-cuenca se encuentra en la región climática de boca costa, la lluvia media mensual de la sub-cuenca es la siguientes: el mes de enero presenta 27 mm, febrero 46.9 mm, marzo 88.2 mm, abril 172.1 mm, mayo 429.5 mm, junio 610.2 mm, julio 433.6 mm, agosto 502.8 mm, septiembre 691.9 mm, octubre 545.9 mm, noviembre 179.5 mm, diciembre 49.4 mm y la lluvia media anual de la sub-cuenca es de 3777 mm y la desviación estándar es de 1200 mm.

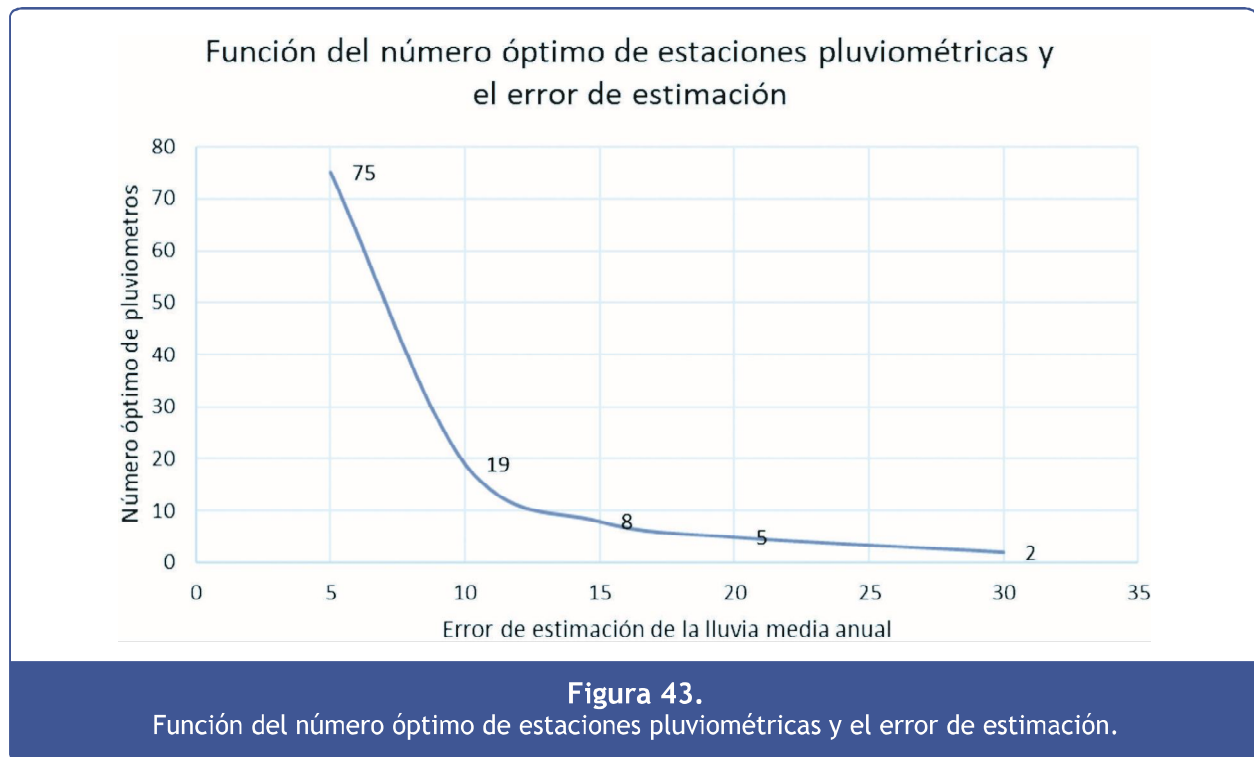
## HIDROLOGÍA

la metodología empleada para estimar la crecida máxima instantánea de la sub-cuenca san francisco fue los caudales máximos regionales de guatemala (insivumeh, 2005), los periodos de retorno fueron de 5, 25, 50 y 100 años utilizando las distribuciones de frecuencia log-normal, gumbel y envolvente. la distribución log-normal estimó los siguientes caudales: 271.7, 480.7, 577.6 y 682.1 m<sup>3</sup>/s. la distribución gumbel estimó los siguientes caudales: 330.6, 571.9, 670.7 y 769.5 m<sup>3</sup>/s. y el método de envolvente estimó los siguientes caudales: 437, 653.6, 750.5 y 836 m<sup>3</sup>/s.



### ESTIMACIÓN DEL NÚMERO DE ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS

Para estimar el número óptimo de estaciones pluviométricas en la sub-cuenca se utilizó la ecuación 53, ya que esta cuenca tiene una lluvia media de 3777 mm y una desviación estándar de 1600 mm, esto nos da un coeficiente de variación de 43.2%, el error de estimación de la lluvia media deseado es de 15%, esto nos da una red de 8 estaciones pluviométricas. En la figura 40, se observa la función del número óptimo de estaciones pluviométricas y el error de estimación de la lluvia media de la sub-cuenca, este tipo de gráficos es esencial cuando se quiere establecer una relación entre el número óptimo de estaciones pluviométricas y el costo del equipamiento.



## UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS

La sub-cuenca tiene un área de  $30 \text{ km}^2$ , o sea que el área de influencia es de  $3.75 \text{ km}^2$  por estación pluviométrica, y el radio de acción es de 1.1 km para un error de estimación de 15%. en la figura 41, se observa la distribución de la red pluviométrica utilizando los criterios preestablecidos y el sistema de información geográfica qgis.

El siguiente paso, es evaluar si las ubicaciones seleccionadas cumplen con los criterios de selección del punto de monitoreo de lluvia.



## ESTIMACIÓN DEL NÚMERO ÓPTIMO Y UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMÉTRICAS

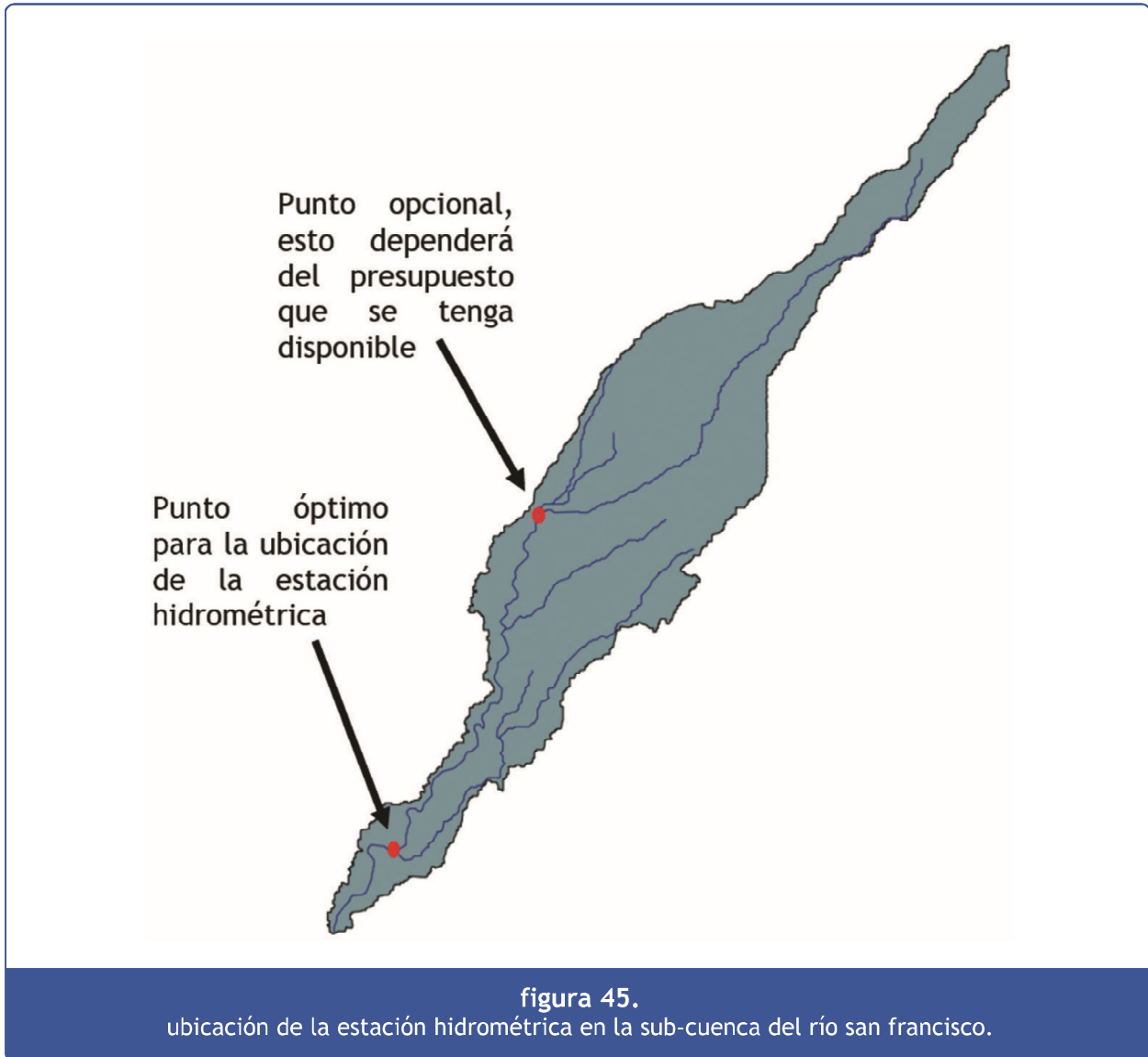
Debido a que no se tienen estaciones hidrométricas en la sub-cuenca, se utilizaron los datos de estimados de crecida para un período de retorno de 2 años usando la metodología de caudales máximos regional de INSIVUMEH (2005). se subdividió la cuenca en 2 partes, simulando 2 estaciones hidrométricas.

El primer criterio a evaluar es el de gradiente, para ello se utilizó la ecuación 54, siendo la diferencia de caudal entre las 2 estaciones hidrométricas de  $24.17 \text{ m}^3/\text{s}$ , y la distancia entre las estaciones es de 6.8 km, por lo que el gradiente es de 3.55, siendo este mayor a dos veces el error de estimación del caudal, el cual es de 0.16, por lo que se cumple el primer criterio.

El área necesaria para un incremento de  $24.17 \text{ m}^3/\text{s}$  es de  $13.1 \text{ km}^2$ , esta área diferencial debe ser mayor o igual a la expresión de la ecuación 56, siendo esta verdadera, ya que ocho veces el error

de estimación al cuadrado por el caudal medio al cuadrado dividido el gradiente de caudal al cuadrado, esta expresión da 0.07, por lo que se cumple la condición.

El criterio de correlación es de  $9 \text{ km}^2$ , y el de representatividad de  $17.8 \text{ km}^2$ , esto hace que se aplique el caso dos de la ecuación 63, por lo que el criterio óptimo es de  $17.8 \text{ km}^2$ , dando como resultado la implementación de una estación hidrométrica como mínimo o dos como máximo. la cual se localizaría aguas debajo de la confluencia.



Se deberá evaluar en campo, si los puntos propuestos cumplen con los criterios de selección del punto de monitoreo de caudales.

## CASO RÍO GÜIPILES

### MORFOMETRÍA DE LA CUENCA

El área de la cuenca es de 13.5 km<sup>2</sup>



**Figura 46.**

Sección de interés para modelar hidrológica e hidráulicamente sobre el río Güipiles para determinar la inundación

### HIDROLOGÍA

La metodología empleada para estimar la crecida máxima instantánea de la cuenca güipiles fue la de los caudales máximos regionales de Guatemala (INSIVUMEH, 2005), los periodos de retorno fueron de 2, 5, 10, 20, 25, 30, 50 y 100 años utilizando las distribuciones de frecuencia log-normal, gumbel y envolvente.

La crecida índice fue de 156.2 m<sup>3</sup>/s para esta cuenca.

Tabla 13

Caudales modulares para distintos periodos de retorno y métodos en la cuenca Güipiles

Método	K según Curva de frecuencia envolvente, Gumbel y LogNormal							
	Tr 2	Tr 5	Tr 10	Tr 20	Tr 25	Tr 30	Tr 50	Tr 100
Envolvente	1.5	2.2	2.7	3.22	3.4	3.53	3.9	4.44
Gumbel	0.9	1.7	2.19	2.68	2.84	2.96	3.32	3.79
LogNormal	0.8	1.4	1.88	2.37	2.53	2.66	3.05	3.62

Tabla 14  
Caudales máximos para distintos periodos de retorno de la cuenca Güipiles

Método	Caudales máximos (m <sup>3</sup> /s)							
	Tr 2	Tr 5	Tr 10	Tr 20	Tr 25	Tr 30	Tr 50	Tr 100
Envolvente	234	345	423	505	533	553	611	696
Gumbel	141	263	343	420	445	464	520	594.1
LogNormal	129	223	295	372	397	417	478	567.4

## ESTUDIO HIDRÁULICO

HEC-RAS es un paquete integrado de análisis hidráulico, en el que el usuario actúa recíprocamente con el sistema a través del uso de una Interface Gráfica del Usuario. Fué desarrollado por el Hydrologic Engineering Center (HEC) de us Army Corps of Engineers. El sistema es capaz de realizar cálculos de los flujos de la superficie del agua y cálculos de flujo uniforme. Para la construcción de la geometría en HEC-RAS, se usó la extensión HEC-GeoRAS de ArcGIS. Con ayuda de esta extensión se realizó el procesamiento de los datos georeferenciados que permiten bajo el entorno de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), facilitar y complementar el trabajo de HEC-RAS.

Para la modelación en el HEC-GeoRAS es necesario trabajar en base a un *Modelo Didigital del Terreno* (MDT), en formato digital TIN (*Trianguled Irregular Network*). Lo más detallado posible. Este modelo puede generarse con ArcMap y su extensión 3D Analyst a partir de un fichero de Shapefile de puntos de nivel del levantamiento topográfico. De este TIN se extrajeron los datos geométricos de las secciones transversales

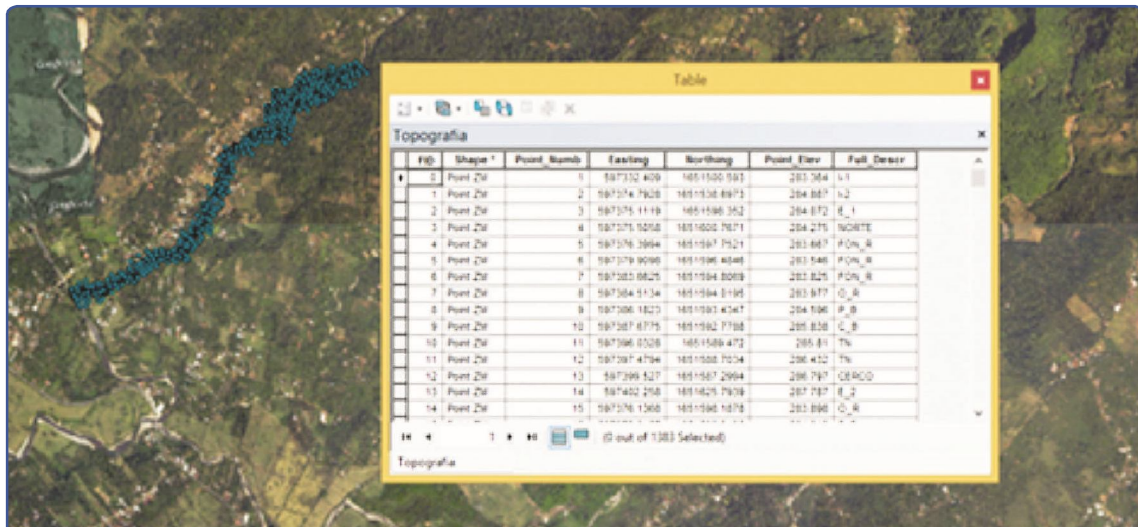


Figura 47.  
Datos de topografía para la modelación hidráulica sobre el río Güipiles.

En cada una de las secciones transversales se definen los parámetros hidráulicos de diseño, tales como, los bancos de fondo del río, líneas de inundación, caudal de diseño y coeficiente N de Manning. Esto para la llanura de inundación y para el cauce.

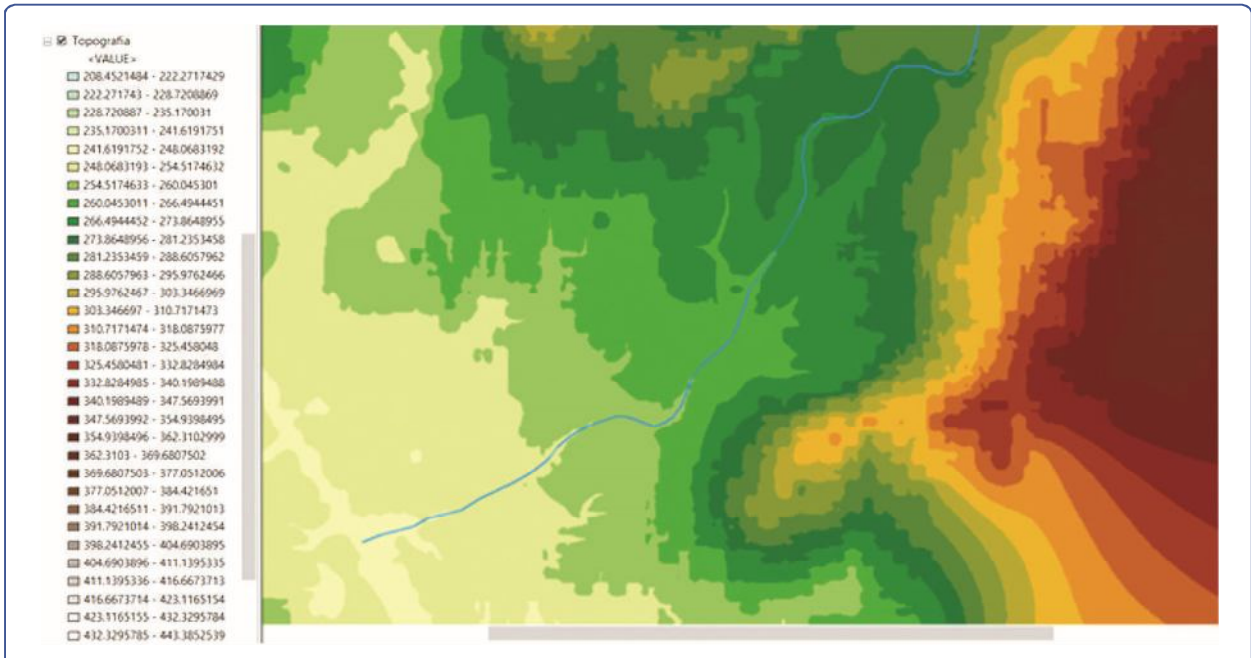


Figura 48.  
Modelo de elevación del área a simular hidráulicamente.

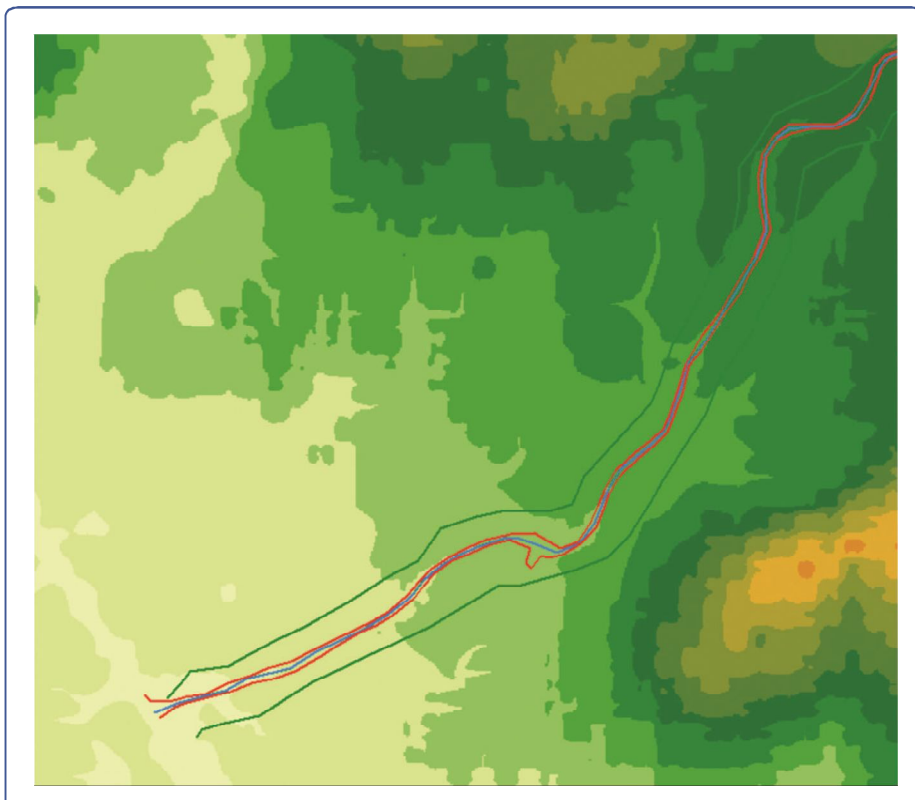
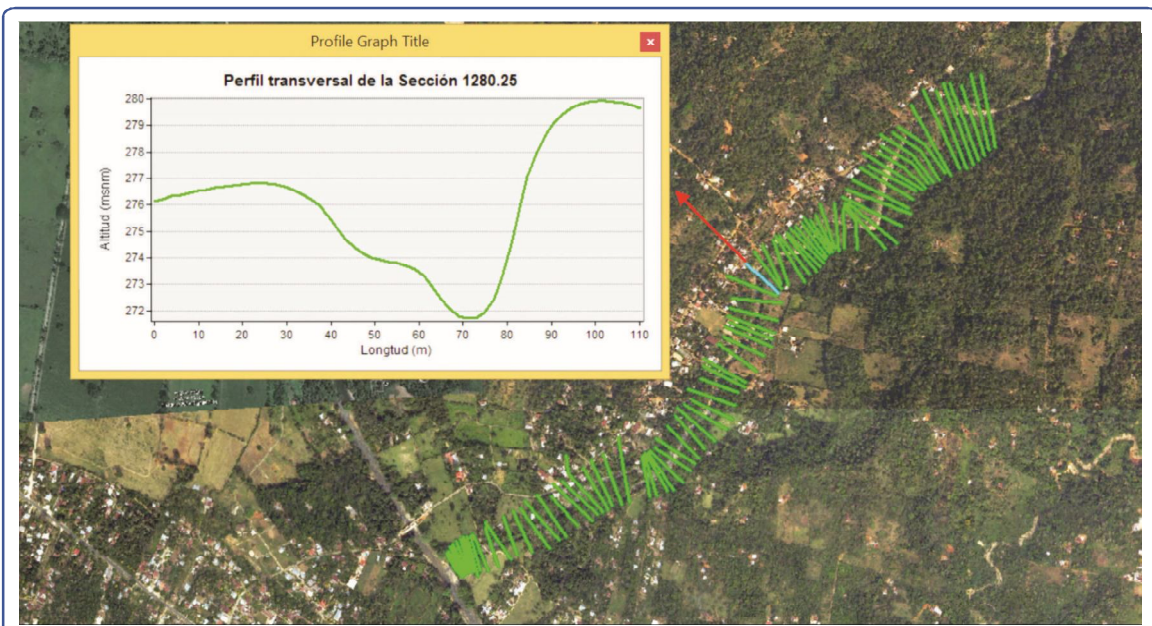


Figura 49.  
Líneas de flujo (azul), banca llena (roja) y línea de inundación (verde).



**Figura 50.**  
Secciones transversales (color verde) sobre el río Güipiles.



**Figura 51.**  
Perfil se la sección transversal 1280.25

El coeficiente de rugosidad representa la resistencia al flujo de agua en cauces y llanuras de inundación. La selección de un valor adecuado de “n” de Manning, tiene relación directa con la precisión de los cálculos de perfiles hidráulicos ya que es uno de los parámetros principales que interviene en la calibración del modelo hidráulico de un canal abierto. Los valores del número de manning fueron obtenidos a partir de ríos bajo condiciones similares. El valor “n” de Manning es variable y depende de un gran número de factores entre los que incluyen: rugosidad de superficie, vegetación,

irregularidades del cauce, alineación del cauce, erosión, y deposición de sedimento, obstrucciones, tamaño y forma del cauce, estación y descarga, cambio temporal, temperatura, material en suspensión y carga de fondo.

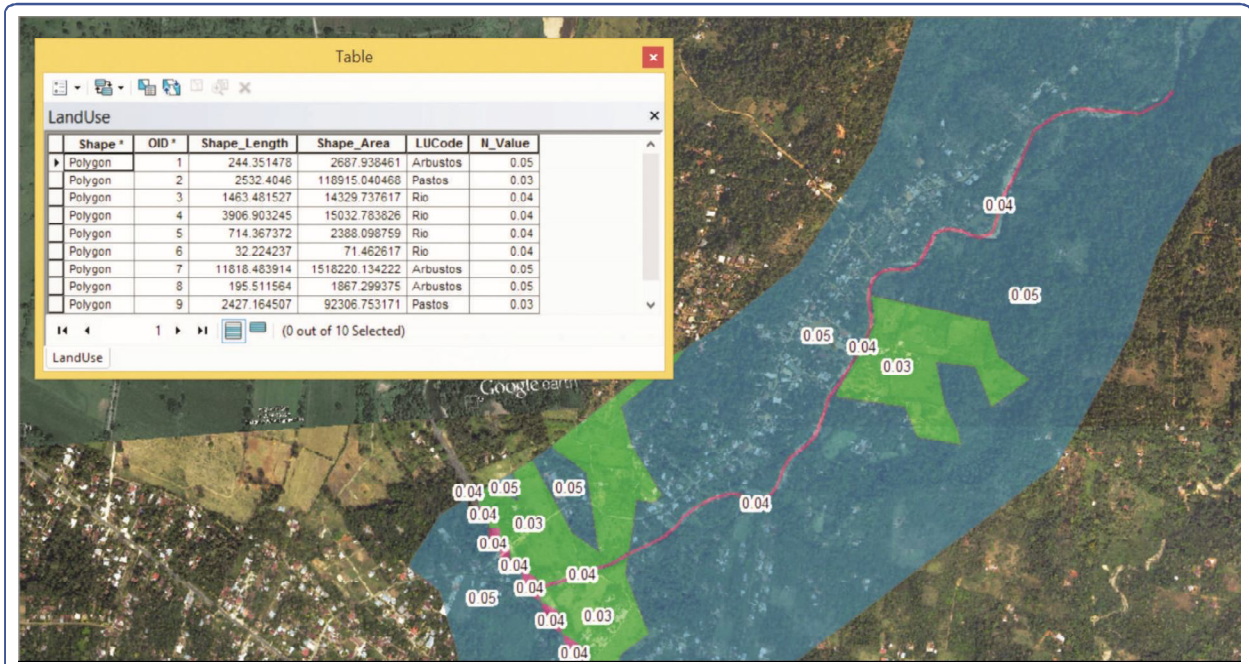


Figura 52.  
Coeficientes de rugosidad de Manning para el río Güipiles.

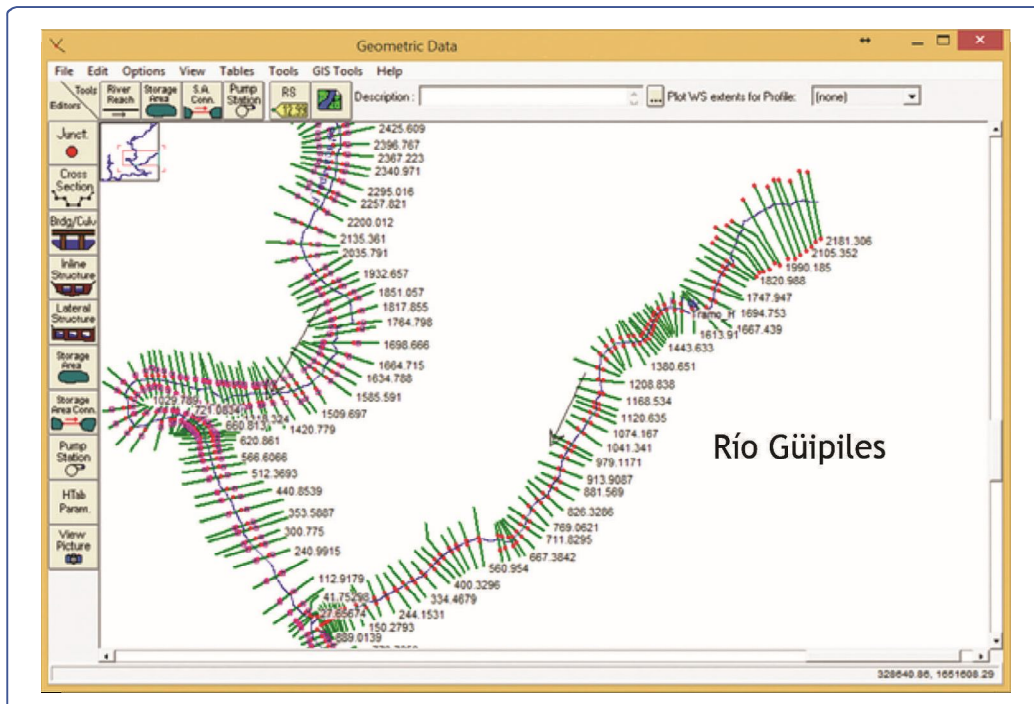


Figura 53.  
Esquema de la geometría del área a modelar hidráulicamente sobre el río Güipiles.

**Flujo permanente**

El caudal de diseño se obtuvo utilizando el método de regional de Crecidas de Gumbel para el río Güipiles. Los caudales con los que se simuló fueron los siguientes:

Tabla 15  
Caudal de diseño para la simulación hidráulica del río Güipiles.

Tramo	Tr 5	Tr 25	Tr 50	Tr 100
Río Güipiles	263	445	520	594

**ESCENARIO DE INUNDACIÓN SIN PROTECCIÓN**

Este es el escenario natural del tramo del río güipiles, ya que debido a la colmatación y deposición de los sedimentos arrastrados por diversos eventos de lluvia han azolvado el cauce reduciendo así la capacidad de transporte de agua y causando el desbordamiento del mismo, afectando a las comunidades que se encuentran cercanas al cauce. Con la estimación de la crecida de 263 m<sup>3</sup>/s se tiene un desbordamiento en la parte baja de la cuenca.

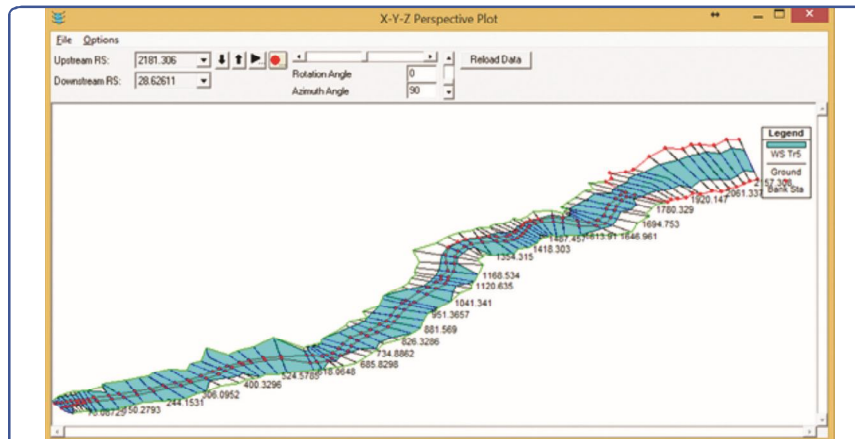


figura 54.  
desbordamiento del río güipiles bajo condiciones actuales tr 5.

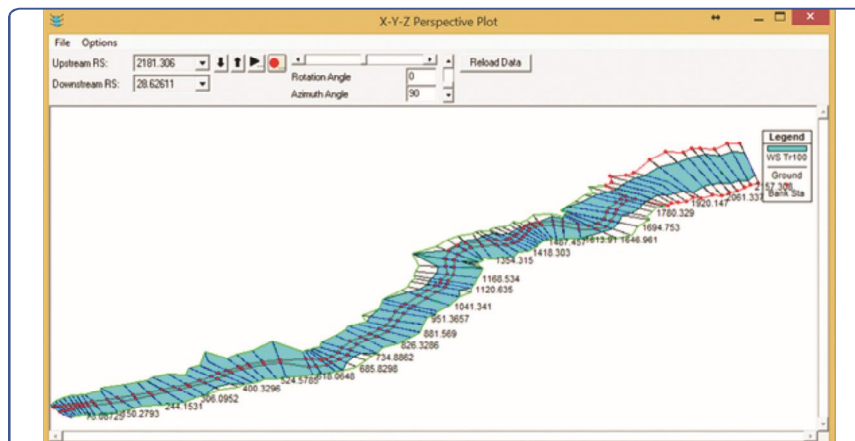
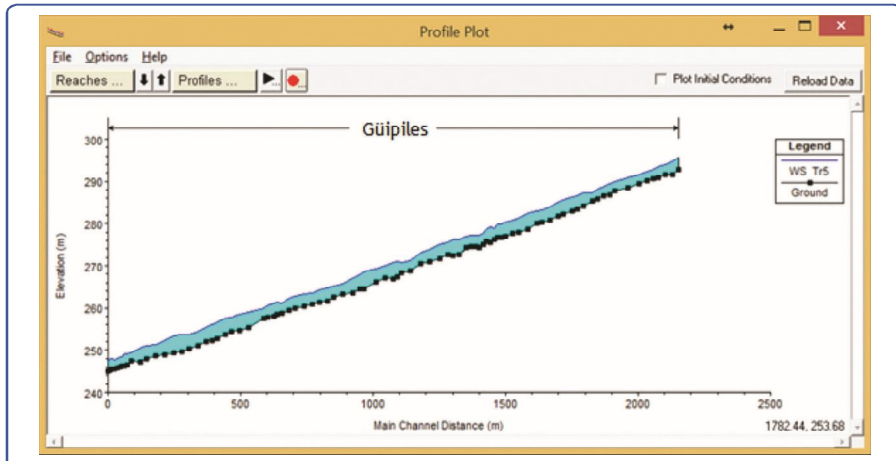
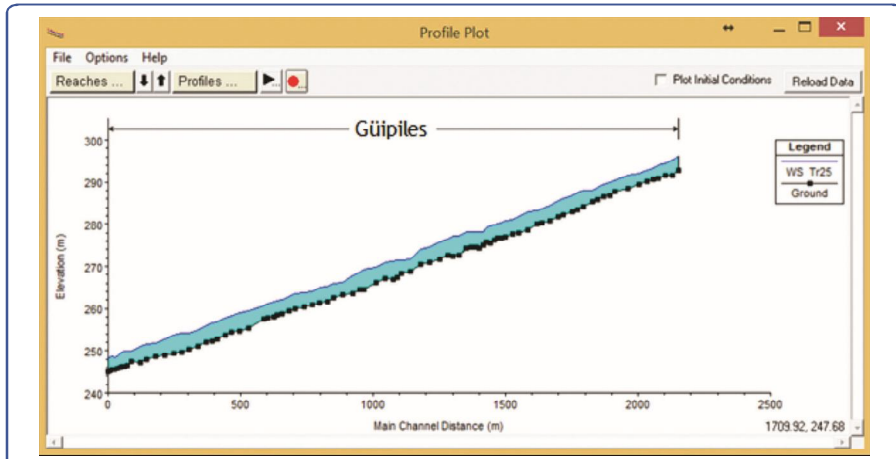


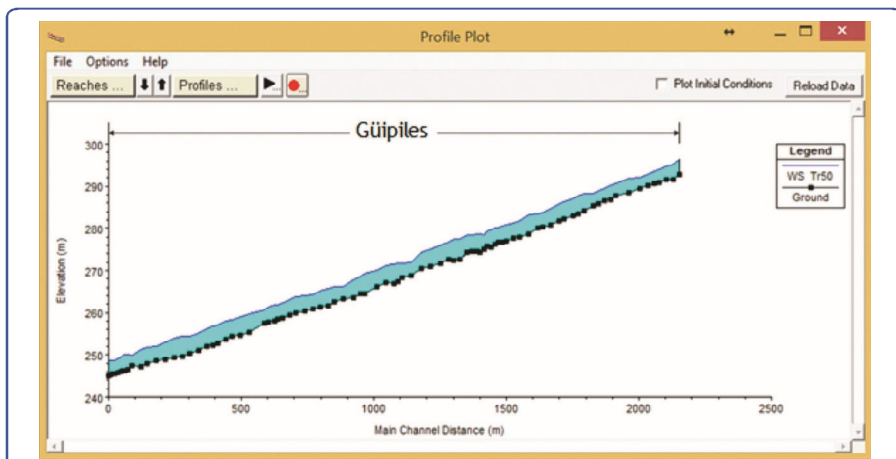
figura 55.  
desbordamiento del río güipiles bajo condiciones actuales tr 100.



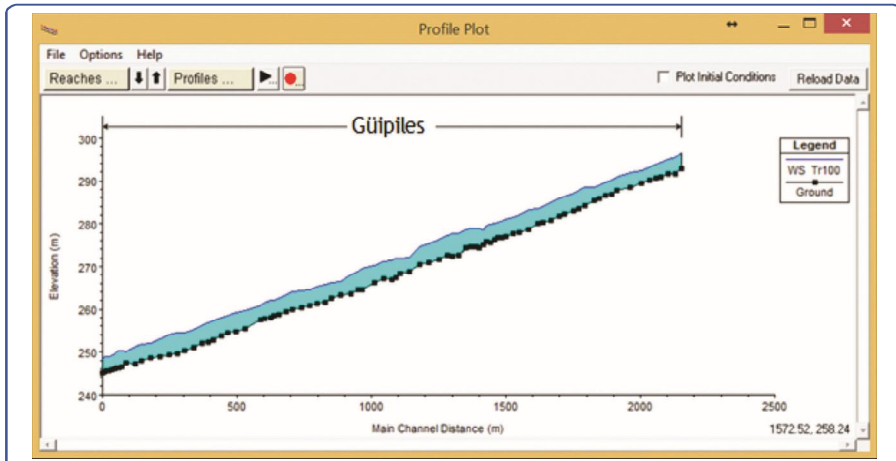
**Figura 56.**  
Perfil de las líneas de flujo para el período de retorno de 5 años.



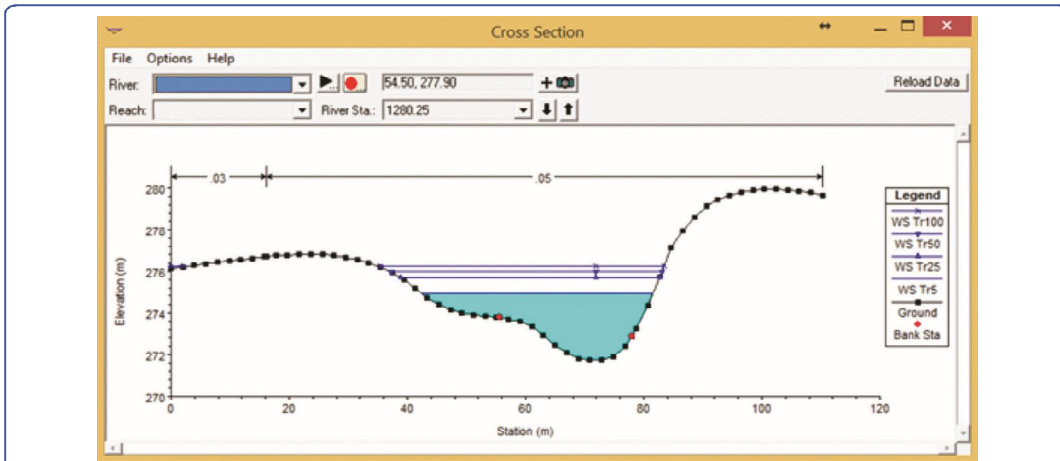
**Figura 57.**  
Perfil de las líneas de flujo para el período de retorno de 25 años.



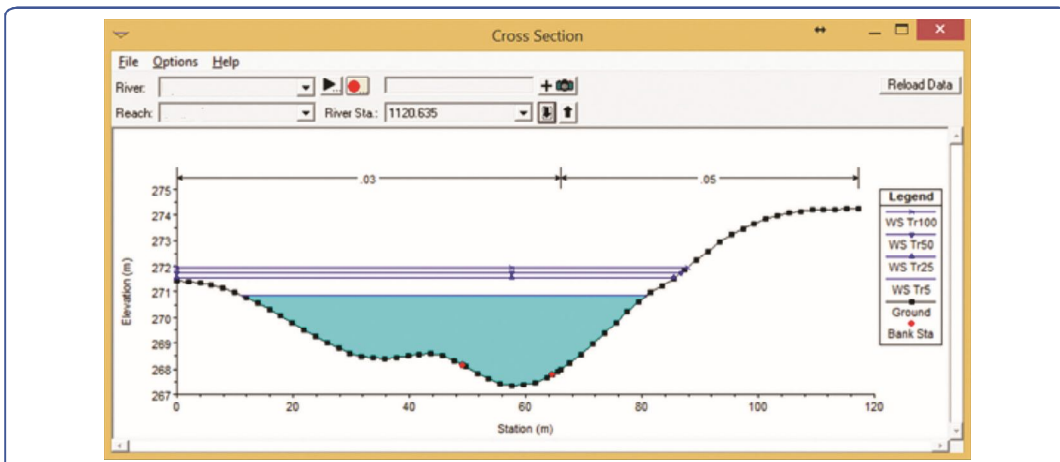
**Figura 58.**  
Perfil de las líneas de flujo para el período de retorno de 50 años.



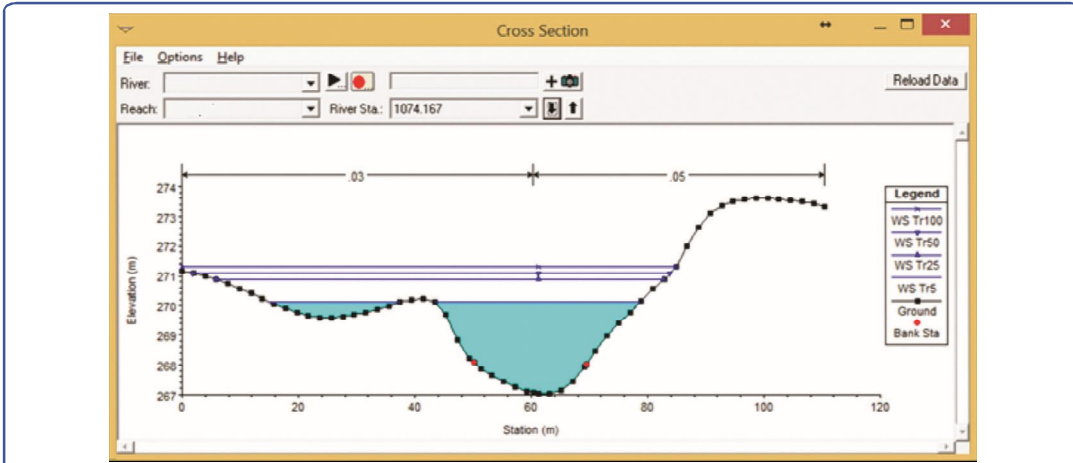
**Figura 59.**  
Perfil de las líneas de flujo para el período de retorno de 100 años.



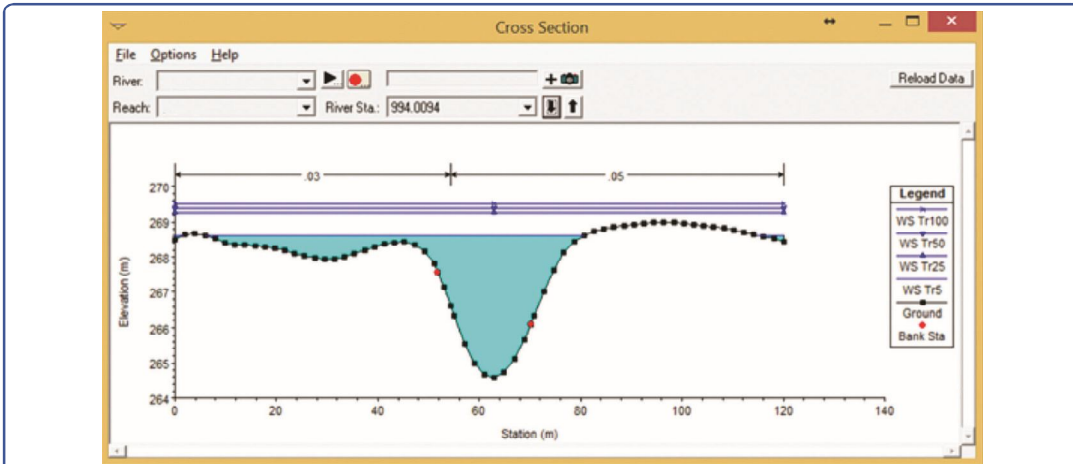
**Figura 60.**  
Sección 1280.25 con sus líneas de flujo para los períodos de retorno de 5, 25, 50 y 100.



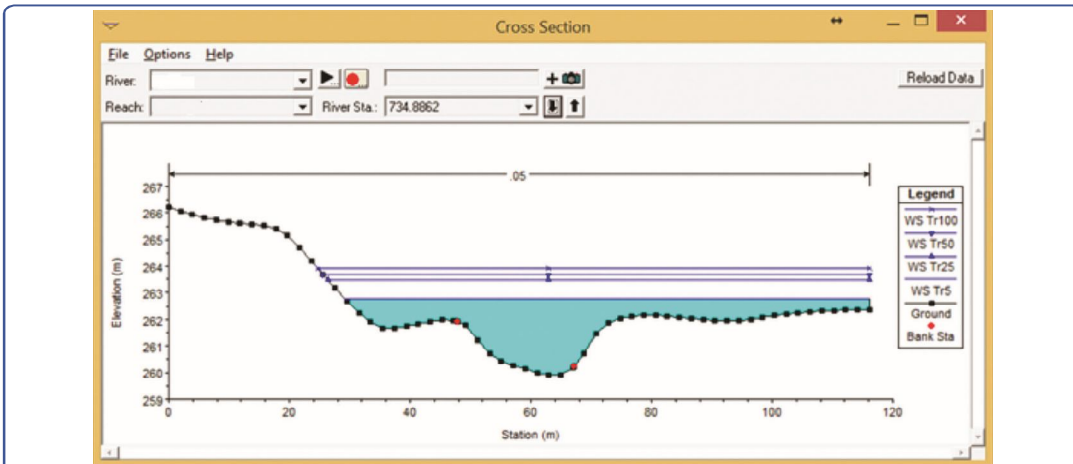
**Figura 61.**  
Sección 1120.635 con sus líneas de flujo para los períodos de retorno de 5, 25, 50 y 100.



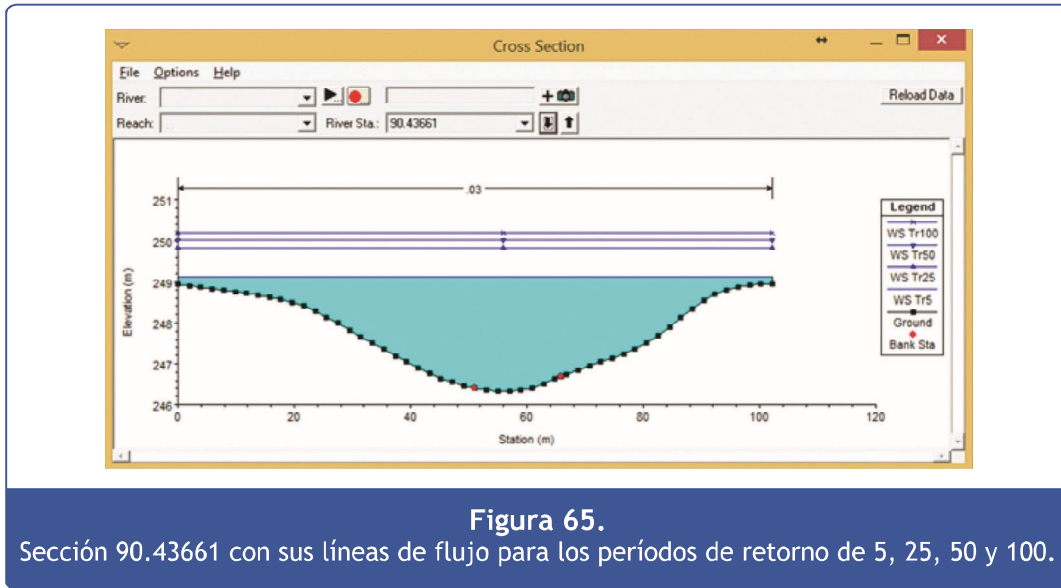
**Figura 62.**  
Sección 1074.167 con sus líneas de flujo para los períodos de retorno de 5, 25, 50 y 100.



**Figura 63.**  
Sección 994.0094 con sus líneas de flujo para los períodos de retorno de 5, 25, 50 y 100.



**Figura 64.**  
Sección 734.8862 con sus líneas de flujo para los períodos de retorno de 5, 25, 50 y 100.



Existe desbordamiento del río en la evaluación de los periodos de retorno 5, 25, 50 y 100 años, principalmente en la zona de meandros. Din embargo, la topografía está limitada al cauce del río, motivo por el cual no se podrá saber la extensión del impacto; pero sí afecta a las comunidades que están alrededor de los 500 metros de la orilla del cauce, dañando los cultivos que se encuentran en las orillas y las casas de los habitantes que están próximos al cauce.

## ESCENARIO DE INUNDACIÓN CON PROTECCIÓN

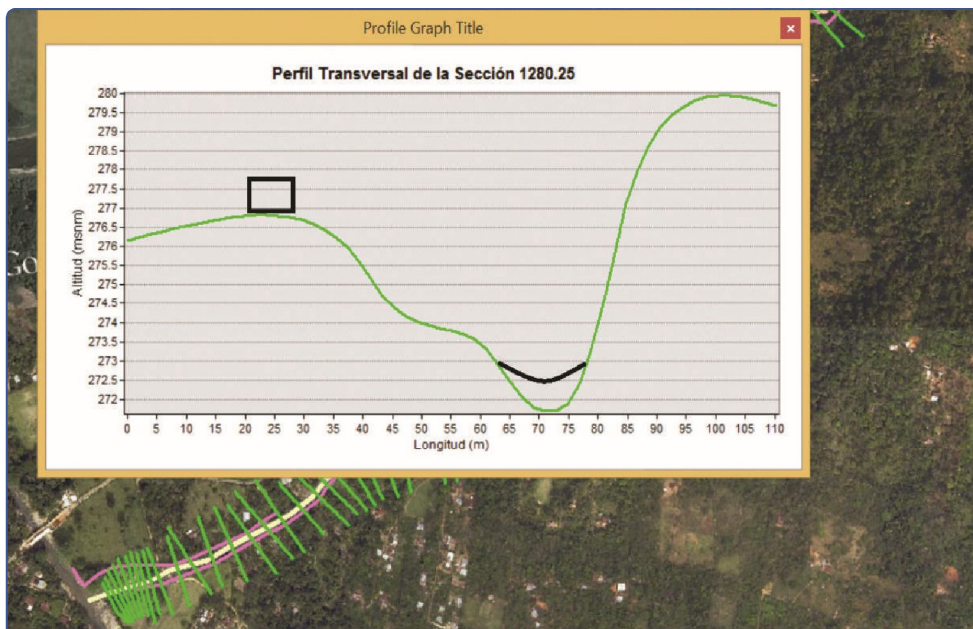
Para evitar el desbordamiento del caudal con período de retorno de 100 años se deberá construir bordas de 3.5 metros en las orillas del cauce y realizar dragado del cauce. La durabilidad de la borda estará en función de los materiales con los que se revistan.



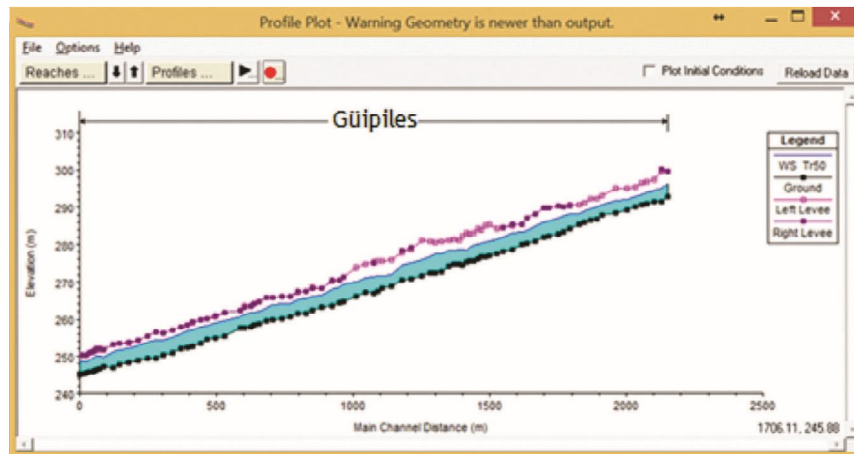


**Figura 67.**  
Zonas donde se realizará el cambio de la topografía de la sección por medio de Dragado (Amarillo) y Bordas o Enrocado (Rosado).

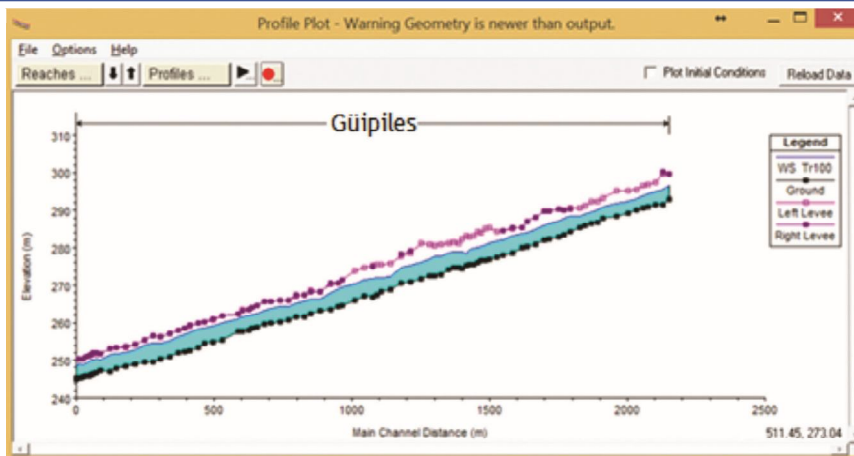
El dragado se realizará a lo largo del río, este tendrá 3.5 m de profundidad y 6 m de ancho, la longitud total a dragar será de 1,686 metros. el volumen del material a remover deberá ser 35,406 metros cúbicos aproximadamente, este material formará parte de las bordas. El área a dragar será de 10,116 m<sup>2</sup>.



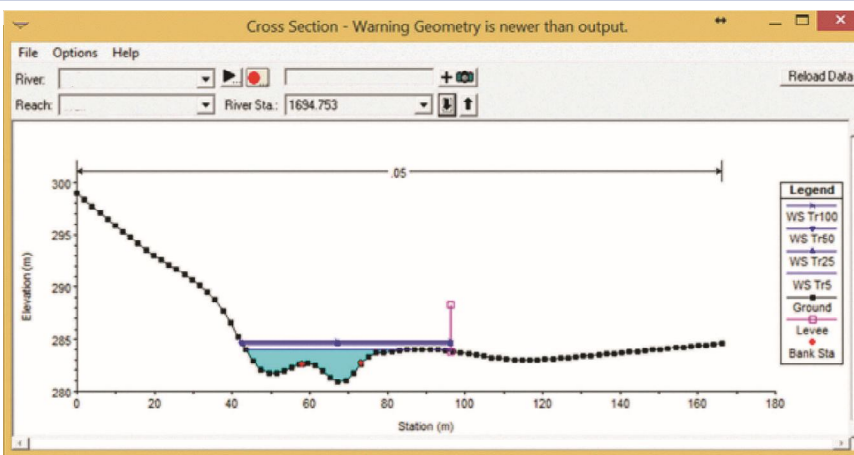
**Figura 68.**  
Cambio de la sección por dragado y esquemas de borda



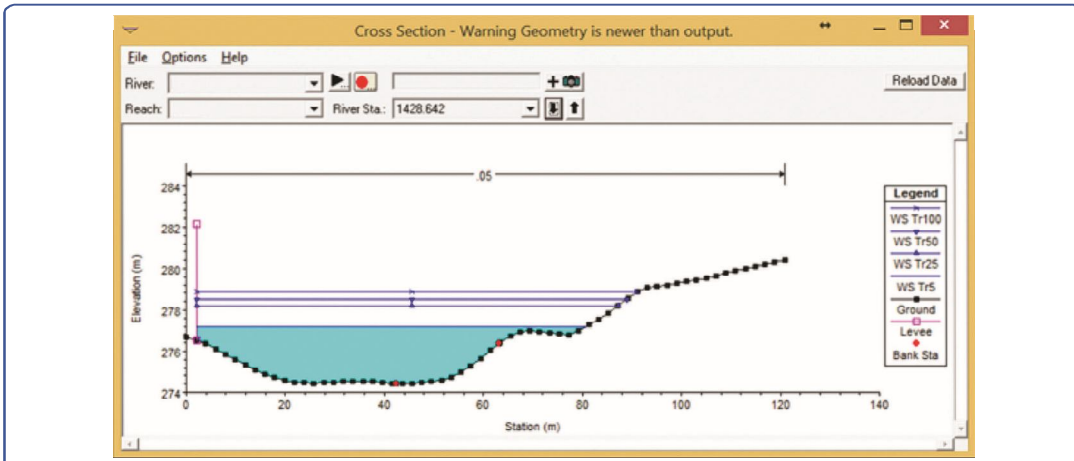
**Figura 69.**  
Simulación hidráulica del tramo del río Güipiles con medidas de protección período de retorno de 50 años.



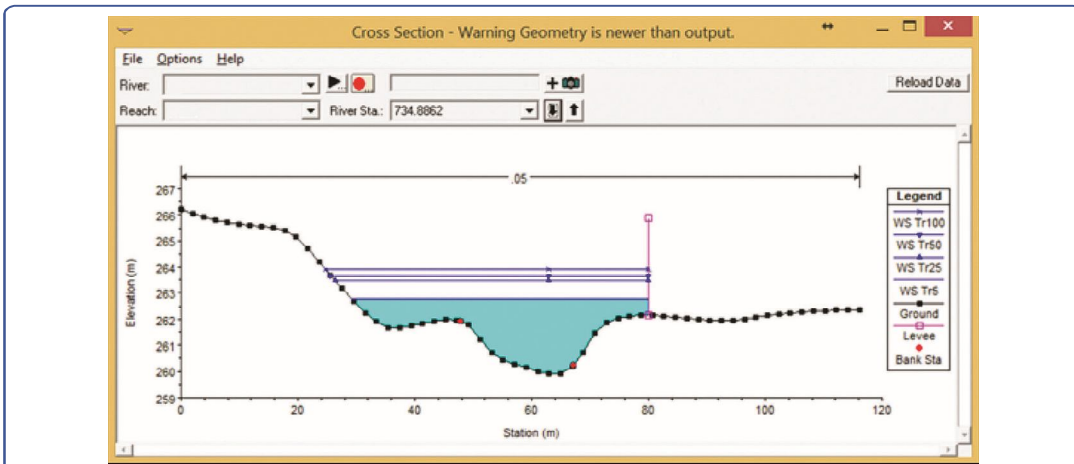
**Figura 70.**  
Perfil hidráulico del tramo del río güipiles con medidas de protección período de retorno de 100 años.



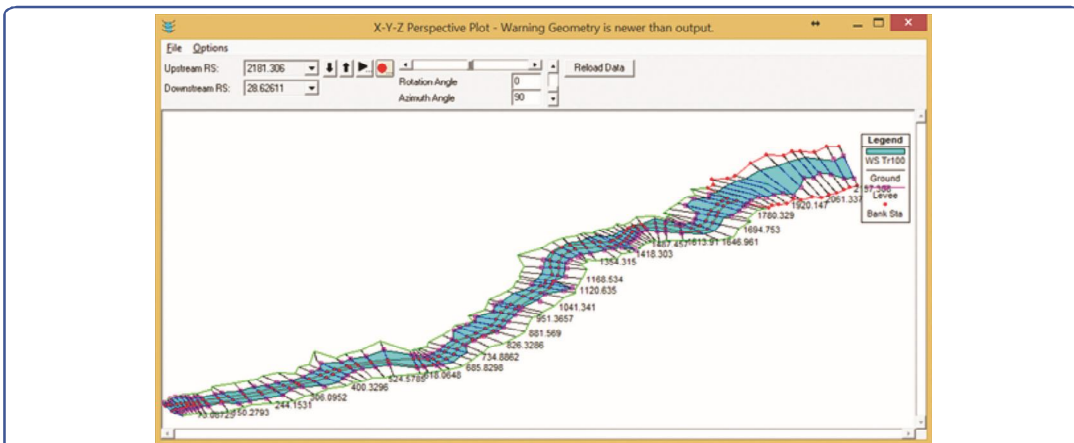
**Figura 71.**  
Perfil de las secciones transversales con las medidas de protección



**Figura 72.**  
Perfil de las secciones transversales con las medidas de protección



**Figura 73.**  
Perfil de las secciones transversales con las medidas de protección



**Figura 74.**  
Simulación hidráulica sobre el tramo del río güipiles con las medidas de protección con un período de 100 años.

Este análisis sirvió para determinar la cota de la crecida que afecta a las comunidades aledañas al río güipiles, y se realizó la propuesta para determinar las medidas de protección ante las inundaciones que se presentan en la zona, el tirante de inundación estuvo entre un metro y 1.6 metros.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Aparicio, F.V. (2015). Fundamentos de hidrología de superficie. México: Limusa
2. Baez J., L. Luchetti, M. Salazar, y M. Genoni. 2016. "Gone with the Storm: Rainfall Shocks and Household Wellbeing in Guatemala." *Journal of Development Studies*.
3. Bardales, W. (2016). Caracterización de la Cuenca Nahualate y 19 subcuenca. Proyecto: Paisajes Productivos Resilientes al Cambio Climático y Redes Socioeconómicas Fortalecidas en Guatemala. PNUD-MARN, Guatemala.
4. Bardales, W.; Castañón, C. (2015). Estudio hidráulico del Río Güipiles, Municipio de Malacatán, departamento de San Marcos (Informe técnico No. 2). Guatemala. Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda.
5. Bardales, W.; Castañón, C. (2015). Estudio hidrológico del Río Güipiles, Municipio de Malacatán, departamento de San Marcos (Informe técnico No. 1). Guatemala. Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda.
6. Biondic, D., Barbalic, D., y Petras, J. (2007). Creager and Franco-Rodier envelope curves for extreme floods in the Danube River Basin in Croatia. In: Proc. XX1st Conference of the Danube Countries on Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management (Bucharest, Romania)
7. Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays, L. W., Saldarriaga, J. G., Santos G., G. R. (1994). *Hidrología aplicada* /cVen Te Chow, David R. Maidment, Larry W. Mays; traducción: Juan G. Saldarriaga; revisión técnica: Germán R. Santos G. Santafé de Bogotá [etc.]: McGraw-Hill.
8. Chow, V. T. (2005). *Hidráulica de canales abiertos* (1a. ed.). Santafé de Bogotá: McGraw-Hill interamericana.
9. Comisión Nacional del Agua. (2010) *Manual teórico practico del observador meteorológico de Superficie*. Recuperado de: <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2011/CD001679.pdf>
10. CONRED (Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres). (2016). *Glosario de gestión integral de riesgos a desastres*. Guatemala
11. Dubón, S.; Castañeda, J. (2010). *Rompimiento de presa de tierra natural mediante un modelo hidráulico físico y modelos hidráulicos matemáticos* (Tesis maestría). Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
12. Fuentes M., J.C. (2008). *Evaluación del sistema de alerta temprana para inundaciones, en la cuenca del río Coyolate* (Tesis maestría). Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
13. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. (2005). *Atlas hidrológico*. Guatemala. Recuperado de: [http://www.insivumeh.gob.gt/?page\\_id=2594](http://www.insivumeh.gob.gt/?page_id=2594)
14. Garde. R. J. (2006). *River Morphology*. New Age International (P) Ltd. Publishers, Dryaganj, New Delhi.
15. Granados, R. E. (2016). *Simulación hidrológica-hidráulica para la gestión de riesgo a inundaciones con base a infiltración, cuenca río Chiquito, Tegucigalpa* (Tesis maestría). Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
16. Javier E. Baez, Leonardo Lucchetti, Maria E. Genoni & Mateo Salazar (2017) *Gone with the Storm: Rainfall Shocks and Household Wellbeing in Guatemala*, *The Journal of Development Studies*
17. Machuca, J. A. (2010). *Propuesta de un sistema de alerta temprana para inundaciones en la cuenca del río Achupapa de el Salvador* (Tesis maestría). Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

18. Maggio, E. (2003). Análisis estadístico de valores extremos. Buenos Aires, Argentina.
19. Martínez, J. M. (2011). Diseño de la estructura general de los componentes principales de un sistema de alerta temprana por inundaciones en la cuenca del río Jiboa, de el Salvador (Tesis maestría). Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
20. MINFIN (Ministerio de finanzas públicas) 2018. Estrategia financiera ante el riesgo a desastres.
21. Morán, A.; Herrera, A.; Fajardo, F.; Cabrera, A.; Macz, A. (2000). Los desastres naturales en áreas precarias: pobreza y vulnerabilidad. Informe final. Centro de Estudios Urbanos y Regionales, Dirección General de Investigación, Universidad de San Carlos de Guatemala.
22. OMM (Organización Mundial de Meteorología). (2011). Guía de prácticas hidrológicas. Sexta Edición, volumen I. OMM No. 168
23. Orozco, E. (2009). Caudales extremos. Compendio de clases de maestría en hidrología. Ciudad de Guatemala.
24. Orozco, E. (2010). Conceptos probabilísticos en hidrología. Compendio de clases de maestría en hidrología. Ciudad de Guatemala.
25. Patel, Anant; B Dholakia, M; Patel, Dhruvesh; Prakash, Indra; Mahmood, Khalid. (2016). Analysis of Optimum Number of Rain Gauge in Shetrunji River Basin, Gujarat - India. International Journal of Science Technology & Engineering. 2. 380-384.
26. Ponce, H. (1972). Evaluación de Crecidas en la República de Guatemala (Tesis de pregrado), Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
27. Rachamandra, A. (2000). Regionalization of Indiana Watersheds for flood Flow predictions. Purdue University. Indianapolis, USA.
28. Robles, J.A. (2017). Guía para la gestión del recurso hídrico con manejo de inundaciones, caso del río Acomé en el municipio la Gomera, Escuintla (Tesis de maestría). Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
29. Robleto, J. A. (2010) Metodología para el diseño e implementación de un sistema de alerta temprana ante inundaciones con aplicación hidrológica e hidráulica (Tesis maestría), Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
30. Rosgen, D. L. (1994). Classification of natural rivers. Catena 22(3). P. 169-199.
31. Rosgen, D. L. (1996). Applied River Morphology. Pagosa, Wildland Hydrology.
32. Rodríguez, H.A. (2010). Hidráulica fluvial. Fundamentos y aplicaciones de socavación. Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería
33. Santos, G. (2010). Propuesta y validación de un método que genere modelos para establecer zonas vulnerables a desastres naturales en la cuenca del río Coyolate. FODECYT, CONCYT, Guatemala.
34. Villón, M. (2006). Hidrología estadística. Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica
35. World Bank, 2017. Unbreakable: Building the Resilience of the Poor in the Face of Natural Disasters
36. Zamora, E. (2008). Evaluación de un sistema de alerta temprana para inundaciones en la parte baja de la cuenca del río Achiguate. (Tesis maestría) , Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.